

آشکارش جبهه‌های دمایی دریای کاسپین با پردازش تصاویر ماهواره

شهناز کالجی^۱، محمد اکبری نسب^{۱*}، عباس عینعلی^۱

۱- گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و محیطی، دانشگاه مازندران، بابلسر

چکیده

نوع مقاله

مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۲

تاریخ چاپ الکترونیکی: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

*نویسنده مسئول:

m.akbarinasab@umz.ac.ir

جبهه‌های دمایی که محدوده‌هایی کم‌عرض بوده و در آنجا تغییرات شدید دمای آب مشاهده می‌شود، از منظر ویژگی‌های زیستی، شیلاتی، شیمیایی، فیزیکی محیط دریا و همچنین بررسی تغییرات اقلیمی دارای اهمیت است. آشکارش جبهه‌های دریایی، در شناسایی و درک دیگر پدیده‌ها مانند فراجوشی، تجمعات زیستی، پیچک و غیره کاربرد اساسی دارد. بنابراین در این پژوهش، جبهه‌های دمایی دریای کاسپین به مدت پنج سال از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس بررسی شد. برای تشخیص و آشکارش جبهه‌های دمایی از روش الگوریتم کنی (Canny) در محیط متلب بهره‌گیری شد. علاوه بر مقایسه مکانی جبهه‌های شناسایی شده دریای کاسپین، همچنین هر سال به سه بازه زمانی چهار ماهه تقسیم و جبهه‌های دمایی هر دوره نیز با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که جبهه‌های دمایی در شمال دریای کاسپین، در دو دوره سه ماهه سپتامبر تا نوامبر و مارس تا می حضور پایدار داشته و در مابقی سال به صورت پراکنده و گسسته هستند. تنها حضور مستمر سالانه جبهه‌ها در شرق خزر جنوبی، ماه مارس است اما در غرب خزر جنوبی، بجز در ماه آگوست، جبهه‌ها به صورت پایدار شناسایی شدند. الگوی جبهه‌های دمایی در شرق و غرب خزر میانی با یکدیگر متفاوت است. به‌طور کلی جبهه‌ها در دوره زمستانی، عمدتاً خوشه‌ای اما در دوره تابستانی آشکارتر و منسجم‌تر هستند. همچنین تعداد جبهه‌های شناسایی شده در دوره پیش‌تابستانی در خزر جنوبی کمتر از دیگر دوره‌ها است. جبهه‌های شناسایی شده، با محل تشکیل امواج داخلی، محدوده‌های پرشیب نزدیک ساحل و الگوی گردش آب دریای کاسپین ارتباط و همخوانی دارد.

کلید واژه‌ها: دمای سطحی دریا، مادیس، الگوریتم کنی، دریای خزر

مقدمه

جبهه اقیانوسی محدوده‌ای باریک بین دو توده آب است که در آن محدوده گرادیان (تغییرات) شدیدی از برخی خصوصیات آب دریا مانند دما، شوری و چگالی وجود [۱]. علی‌رغم پهنای باریک، جبهه‌های اقیانوسی دینامیک فعالی داشته و در ارتباط جو و اقیانوس، نقش مهمی ایفا می‌کنند [۲]. ویژگی‌های جبهه‌های دریایی متعدد بوده و از منظرهای مختلفی قابل مقایسه هستند. مقیاس طولی جبهه‌ها از چندین متر تا چندین هزار کیلومتر و از نظر زمانی نیز ممکن است به‌صورت کوتاه مدت (چندین روز) تا دائمی شکل بگیرند. عمق نفوذ عمودی جبهه‌ها نیز از چندین متر تا یک کیلومتر متفاوت است [۳]. به‌دلیل تغییرات زیاد دما در محدوده جبهه‌های دمایی، شرایط زیستی برای طیف وسیعی از جانداران فراهم شده و به همین دلیل تنوع زیستی در این مناطق فراوان است [۴].

همه انواع جبهه‌های اقیانوسی مانند جبهه دما، جبهه شوری، جبهه کدورت، جبهه مواد مغذی، جبهه کلروفیل و غیره تاثیرات کاملاً واضح و آشکاری بر محیط خود داشته و اغلب ویژگی‌های زیستی و غیرزیستی را در محدوده خود متاثر می‌کنند. در این میان، جبهه دما، با توجه به اثرگذاری بر طیف وسیعی از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی، دارای اهمیت بیشتری است [۵-۷]. از منظر فیزیکی، جبهه‌های دمایی، اطلاعات مهمی از ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی ستون آب نظیر جریان‌ات، پیچکها، اختلاط، چرخندها، فراجوشی و فروجوشی و غیره را شامل می‌شود.

تجمع مواد مغذی و فیتوپلانکتونها، مکان مناسبی برای زندگی جانوران دریای فراهم می‌کند [۶]. این محدوده که نقاط گرم (Hotspots) شهرت دارند، مکان مناسبی برای تخم‌ریزی، نگهداری و تغذیه جانوران دریایی و حتی تجمع پرندگان دریایی است و متاثر از جبهه‌های دمایی است [۸]. به همین دلیل، تشخیص جبهه‌های دمایی از منظر صیادی و شیلاتی اهمیت فراوان داشته و یک عامل کلیدی در تشخیص مکان‌های مناسب صیادی است، به نحوی که تعداد جبهه‌های دمایی با مقدار ماهی صید شده کاملاً مرتبط است [۹]. عوامل فیزیکی مختلفی از جمله ورود آب رودخانه‌ها به دریا، اختلاط جریان‌های جزرومدی، همگرایی جریان‌ها، جریان‌های مرزی، فراجوشی، شرایط توپوگرافی (مانند جریان‌های ناشی از فلات قاره) از جمله دلایل سبب تشکیل جبهه‌ها در محیط دریا هستند [۱۰].

دریای خزر که از آن به عنوان بزرگترین دریاچه دنیا یاد می‌شود، با وجود بسته بودن و عدم تبادل آب با دریاهای دیگر، به دلیل شرایط طبیعی، برخورداری از منابع طبیعی (بیولوژی و مواد معدنی) و ایفا نمودن نقش مهم ژئوپولوتیکی دارایی نقشی کاملاً برجسته و ممتاز در منطقه است. متاثر بودن رژیم طبیعی دریای خزر از عوامل خارجی نظیر دبی رودخانه و پارامترهای جوی و همچنین دسترسی کشورهای متعدد و بهره‌برداری بیش از حد از این دریا سبب تغییرات سریع و چشمگیر در این دریا نسبت به دریاهای آزاد شده است. به همین دلیل دریای خزر در سال‌های اخیر با پیامدهای متعدد و جدی مانند تغییرات شدید نوسانات سطح آب، انقراض جانوران دریایی نظیر ماهیان خاویاری، آلودگی‌های نفتی و غیره مواجه شده است. همه این موضوعات ایجاب می‌کند که شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی دریای خزر و تغییرات آن مرتباً مورد بررسی قرار گیرد. دمای سطحی و جبهه‌های دمایی از بهترین شاخص‌های بررسی تغییرات شرایط این دریا است [۱۱، ۱۲].

دمای سطحی دریاها و تغییرات آن (جبهه‌های دمایی) به عنوان محرک قدرتمند در الگوی آب و هوای جهانی شناخته می‌شود که نقش مهمی در تبادلات انرژی، اندازه حرکت و رطوبت بین دریا و اتمسفر دارد. بنابراین شناخت آن برای تغییرات آب و هوایی زمین و دریا هوا بسیار حائز اهمیت است.

امروزه سنجش از دور ابزاری کاربردی، کم‌هزینه و انعطاف‌پذیر جهت مطالعات منابع آب است. با توجه به وسعت دریاها و عدم دسترسی سریع و انجام عملیات میدانی اندازه‌گیری در زمان کوتاه، اهمیت سنجش از دور در مطالعات دریایی کاملاً مشخص است. در مکان‌های از دریا که در آن تغییرات شدید پارامترهای دریایی وجود دارد، مانند دهانه رودخانه‌ها و جبهه‌های اقیانوسی، نقش سنجش از دور کاملاً کاربردی و آشکار است [۱۳].

نقشه دمای سطحی دریاها با استفاده از سنسورهای مادون قرمز بکار رفته در ماهواره‌ها قابل سنجش است. در این روش علاوه بر صرفه جویی در هزینه و زمان، نقشه‌های بزرگ مقیاسی از دمای سطحی استخراج می‌شود که امکان مقایسه مکانی و زمانی در آن به راحتی فراهم است [۱۴]. سنجنده مادیس (MODIS^۱) که بر روی ماهواره آکوا^۲ ناسا قرار دارد و دمای آب را در بالاترین لایه میلی‌متری سطح آب دریاها اندازه‌گیری می‌کند از بهترین ابزارها در این زمینه است [۱۵].

واگاو^۳ و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی جبهه‌های اقیانوسی و خصوصیات توده آب دریای مرکزی ژاپن را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که جبهه‌های دما، به دلیل تزریق مواد مغذی از عمق آب به لایه سطحی، از نظر بیولوژیکی مناطقی فعال محسوب می‌شوند [۱۶]. سالداس و لارا^۴ (۲۰۲۰) تکامل فصلی جبهه‌های دمای سطح دریای چین را با استفاده از

¹ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

² Aqua

³ Wagawa

⁴ Saldías and Lara

ماهواره مادیس بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تشخیص جبهه‌های دمایی فلات قاره در فصل زمستان که همزمان با تخلیه بیشتر آب رودخانه‌ها به دریا است، راحتتر است [۱۷]. بلیکن^۱ و همکاران (۲۰۰۹) جبهه‌های دمایی سراسر دریاهای زمین را به مدت ۱۲ سال بررسی کردند. در این تحقیق جبهه‌های دمایی پایدار شناسایی و نشان داده شد که عمده این جبهه‌ها به جریان‌های زمین‌گرد وابسته بوده و دلیل پیدایش جبهه‌های اکوسیستمی بزرگ دریایی محسوب می‌شوند [۱۸]. لین^۲ و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی جبهه‌های دمایی دریای زرد را در تابستان را بررسی کرده و نشان دادند که ویژگی‌های توپوگرافی و اختلاط جزرومدی در تشکیل جبهه‌های دوگانه در این دریا موثر هستند [۱۹]. سارما^۳ و همکاران (۲۰۱۸) پاسخ اکوسیستم شمال شرق دریای عرب را به جبهه‌های دمایی بررسی کرده و نشان دادند که در جبهه‌های دمایی شکل گرفته در دریا، پتانسیل بالایی بر تولیدات شیلاتی دارد [۲۰]. تسنگ^۴ و همکاران (۲۰۱۴) جبهه‌های دمایی شمال اقیانوس هند را با استفاده از سنجنده مادیس بررسی کرده و ارتباط نزدیک آنها را با میزان صید ماهی و تولیدات شیلاتی نشان دادند [۹]. کارمی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی با عنوان «آشکارش جبهه‌های دمایی ساحلی خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از تصاویر مادیس» نشان دادند که اکثر جبهه‌ها در مکان‌های پراثری و در راستای جریان‌های تشکیل شده‌اند. همچنین پنج ناحیه ی جبهه دمایی پایدار در نواحی دور از ساحل و هشت ناحیه در نزدیک ساحل در این آب‌ها شناسایی شد. در این تحقیق، زمان‌هایی از سال که شاهد بیشترین و کمترین حضور جبهه‌های دمایی است، مشخص گردید [۲۱].

در این تحقیق، جبهه‌های دمایی سطحی دریای خزر که از منظر علوم فیزیک دریا، شیمی دریا و زیست دریا و به‌ویژه شیلاتی حائز اهمیت است، با استفاده از تصاویر ماهواره مادیس و روش الگوریتم کنی^۵ شناسایی و استخراج شده‌اند. با شناسایی و درک صحیح از ابعاد زمانی و مکانی جبهه‌های دمایی سطحی، امکان مدیریت منابع شیلاتی و همچنین پیش‌بینی پدیده‌های مرتبط با علوم اقیانوس‌شناسی فراهم خواهد گردید.

مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، دریای خزر است که در محدوده ۳۷-۴۷ درجه عرض شمالی و ۴۷-۵۵ درجه طول شرقی قرار گرفته است. این پهنه آبی با ۱۲۱۰ کیلومتر طول، ۳۲۰ کیلومتر عرض و مساحتی نزدیک به ۴۳۸۸۰۰ کیلومتر مربع، بزرگترین دریاچه جهان است. دریای خزر توسط کشورهای ایران، آذربایجان، روسیه، قزاقستان و ترکمنستان احاطه شده است [۱۱]. در (شکل ۱) موقعیت دریای خزر و کشورهای حاشیه‌ای آن نشان داده شده است.

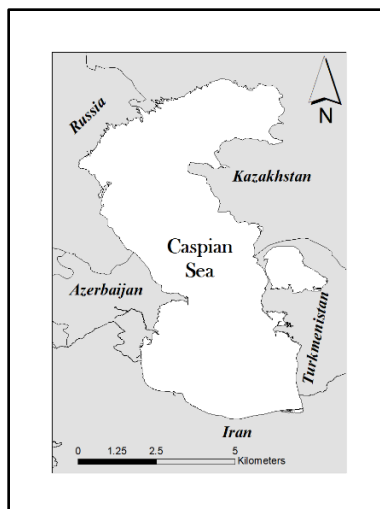
¹ Belkin

² Lin

³ Sarma

⁴ Tseng

⁵ Canny



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه (دریای خزر)
Fig (1): Location of study area (Caspian Sea)

۲-۲- جمع‌آوری داده (تصاویر ماهواره)

هر سیستم سنجش از دور (سنجنده) با چهار قدرت تفکیک، شامل قدرت تفکیک مکانی، زمانی، طیفی و رادیومتریک شناخته می‌شود. در این تحقیق، از تصاویر سنجنده مادیس که هدف اصلی آن تهیه هم‌زمان داده‌های زمین، اقیانوس و اتمسفر است استفاده شده است. این سنجنده از بهترین ابزارها برای سنجش دمای سطحی اقیانوس‌ها از راه دور است. دامنه طیفی این سنجنده در محدوده طول موج‌های $0.4 - 14.4 \mu\text{m}$ است که نیاز کاربران مختلف علوم محیطی را به خوبی برآورده می‌سازد. قدرت تفکیک مکانی سنجنده مادیس در باندهای ۱ و ۲ برابر ۲۵۰ متر، در باندهای ۳ تا ۷ برابر ۵۰۰ متر و در ۲۹ باند باقی مانده برابر ۱۰۰۰ متر است. پهنای نوارهای تصویربرداری این سنجنده برابر ۲۳۳۰ کیلومتر است که همین موضوع پوشش جهانی را در هر یک تا دو روز امکان‌پذیر می‌سازد. حساسیت رادیومتریک ۱۲ بیت، وجود ۳۶ باند طیفی مجزا و تصحیح هندسی پیشرفته از دیگر ویژگی‌های این سنجنده است. علاوه بر ویژگی‌های مذکور، وجود باندهای حرارتی متعدد از دلایل استفاده از سنجنده مادیس برای بررسی جبهه‌های دمایی در این تحقیق است [۲۲]. به این منظور دمای سطح آب دریای خزر بصورت ماهانه به مدت پنج سال از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ بررسی و جبهه‌های دمایی مربوطه با استفاده از الگوریتم کنی شناسایی و استخراج شد. علاوه بر بررسی مکانی جبهه‌های دمایی، به منظور بررسی زمانی نیز، تصاویر هر سال در سه دوره با هم مقایسه شدند.

۲-۳- روش‌های تشخیص جبهه

برای آشکارسازی و تشخیص جبهه (لبه) در تصاویر ماهواره، روش‌های متعددی ارائه شده که اساس بسیاری از آنها مشتق‌گیری، عملگرهای صریح ریاضی و هیستوگرام است. الگوریتم کنی روشی برای تشخیص جبهه‌ها و بررسی ویژگی‌های آنها براساس مشتق‌گیری است و در مناطق نزدیک ساحل کاربرد دارد [۲۳]. الگوریتم کنی به شدت متأثر از نویز تصویر است، و بنابراین می‌بایست قبل از استخراج جبهه‌ها، نویز را تصویر اولیه حذف کرد. به این منظور معمولاً از یک ماسک

ساده یا فیلتر گوسین^۱ استفاده می‌شود. بعد از حذف نویز از تصویر، می‌توان قدرت لبه (گرادیان) را با استفاده از الگوریتم سوبل^۲ در دو راستای X و Y به دست آورد. برای هر بلوک مقدار گرادیان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

اندازه و مقدار G نشان‌دهنده قدرت لبه است. راستای لبه برای هر بلوک با استفاده از رابطه (۲) مشخص می‌شود:

$$\theta = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (2)$$

باید توجه کرد که تنها زوایای ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه را می‌توان به‌عنوان راستای لبه در نظر گرفت. برای جلوگیری از خطا، از دو حد آستانه بالا (T2) و پایین (T1) برای تشخیص جبهه استفاده می‌شود. پیکسلی با مقدار کمتر از T1 به عنوان لبه محسوب نمی‌شود. پیکسلی با مقدار بیشتر از T2 به عنوان لبه در نظر گرفته می‌شود. چنانچه مقدار پیکسل از T1 بیشتر و از T2 کمتر باشد، تحت شرایطی خاص (اتصال بین آن پیکسل و پیکسل‌های لبه وجود داشته باشد) می‌توان آن پیکسل را به عنوان لبه مشخص کرد [۲۴].

۳- یافته‌ها و بحث

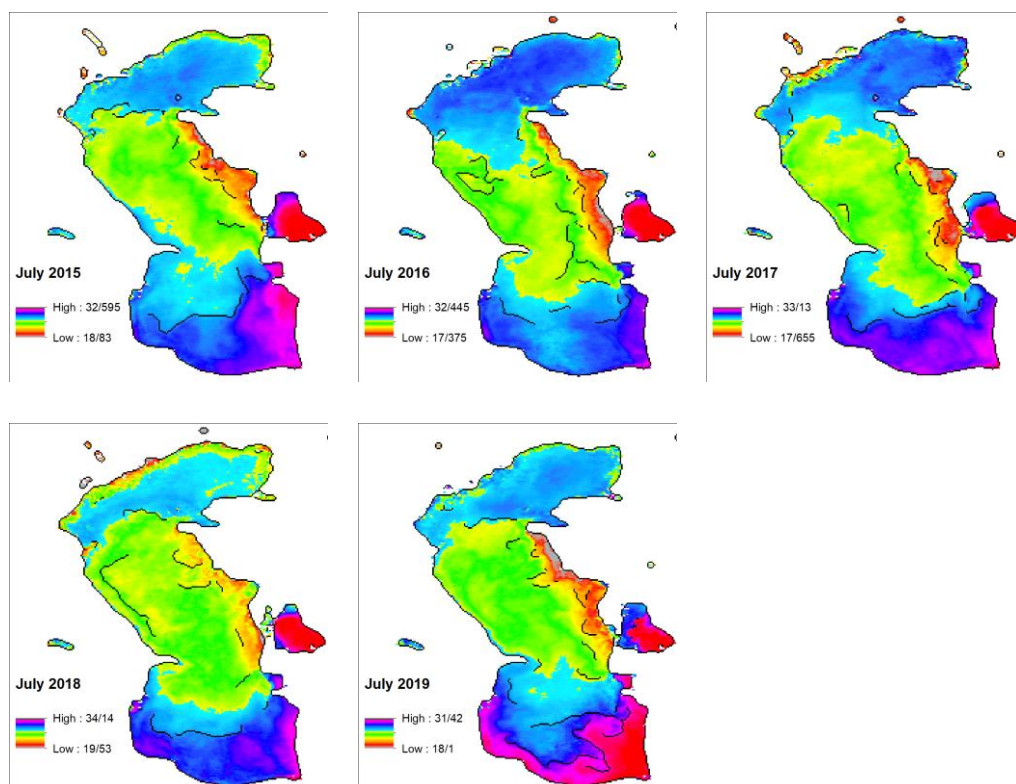
تصاویر ماهانه جبهه-های دمایی به سه دوره زمانی (چهار ماهه) تقسیم‌بندی شده است. ماه‌های ژوئن تا سپتامبر به‌عنوان دوره تابستانی، ماه‌های اکتبر تا ژانویه به‌عنوان دوره زمستانی و ماه‌های فوریه تا می به‌عنوان دوره پیش‌تابستانی نام‌گذاری شده که در بخش (۱-۳) ویژگی‌های هر دوره به‌منظور مقایسه زمانی جبهه‌ها ارائه شده است. همچنین در بخش (۲-۳) نیز با منطقه‌بندی دریای خزر و بررسی ویژگی‌های جبهه‌های هر منطقه، مقایسه مکانی جبهه‌ها ارائه شده است.

۳-۱- مقایسه زمانی جبهه‌ها

در دوره تابستانی، جبهه‌های متعددی با الگوریتم کنی شناسایی شدند. در ژوئن و ژوئیه شکل‌گیری جبهه‌ها آشکارتر است، اما در انتهای ژوئیه و سپتامبر به‌تدریج از تعداد آنها کاسته می‌شود. در این دوره، جبهه‌های شکل گرفته در خزر جنوبی منسجم‌تر و بلندتر هستند و به سمت مناطق ساحلی امتداد می‌یابند. در آگوست بیشتر جبهه‌ها در سواحل قزاقستان، ترکمنستان و ایران شکل گرفت و تقریباً هیچ جبهه‌ای در سواحل کشور آذربایجان شناسایی نشد. با وجود اینکه جبهه‌های شناسایی شده در سواحل روسیه در این دوره، کوتاه و پراکنده بود، اما در سپتامبر ۲۰۱۷، جبهه بزرگی با طول بیش از ۳۵۰ کیلومتر در سواحل این کشور شکل گرفت. در (شکل ۲) جبهه‌های دمایی شناسایی شده با روش کنی در ماه ژوئیه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ نشان داده شده است.

¹ Gaussian Filter

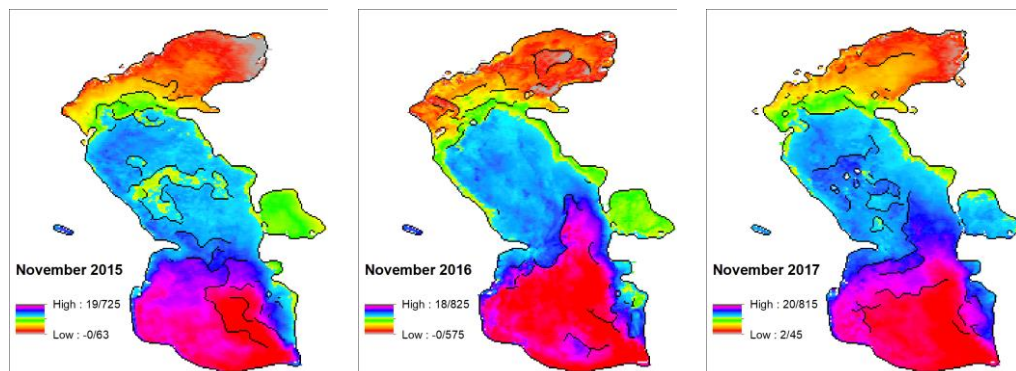
² Sobel Algorithm

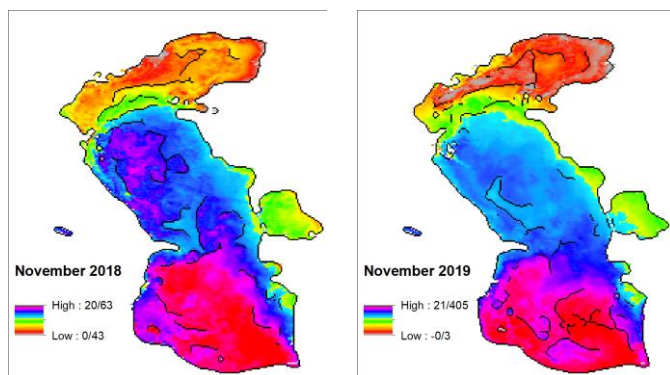


شکل (۲): جبهه‌های دمایی شناسایی شده با روش کنی در ماه ژوئیه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹

Fig (2): Sea surface temperature fronts detected by Kenny's algorithm in July from 2015 to 2019

در دوره زمستانی (اکتبر تا ژانویه)، جبهه‌های بیشتری که عمدتاً خوشه‌ای هستند، شروع به شکل‌گیری می‌کنند. جبهه‌های سواحل قزاقستان و ترکمنستان در ماه اکتبر، در همه دوره پنج ساله این تحقیق شناسایی شدند. در ماه نوامبر نیز جبهه‌های متعددی در حال شکل‌گیری است، اما مکان ثابتی برای آنها نمی‌توان یافت. در دسامبر ۲۰۱۷، جبهه منحصر به فردی در ۶۰ کیلومتر ساحل ترکمنستان به طول تقریبی ۳۰۰ کیلومتر در امتداد ساحل شکل گرفت. در دسامبر ۲۰۱۶ نیز، جبهه‌ای مشابه در ۳۰ کیلومتری سواحل ایران (استان مازندران) با طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر شناسایی شد. در (شکل ۳) جبهه‌های دمایی شناسایی شده با روش کنی در ماه نوامبر سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ نشان داده شده است.

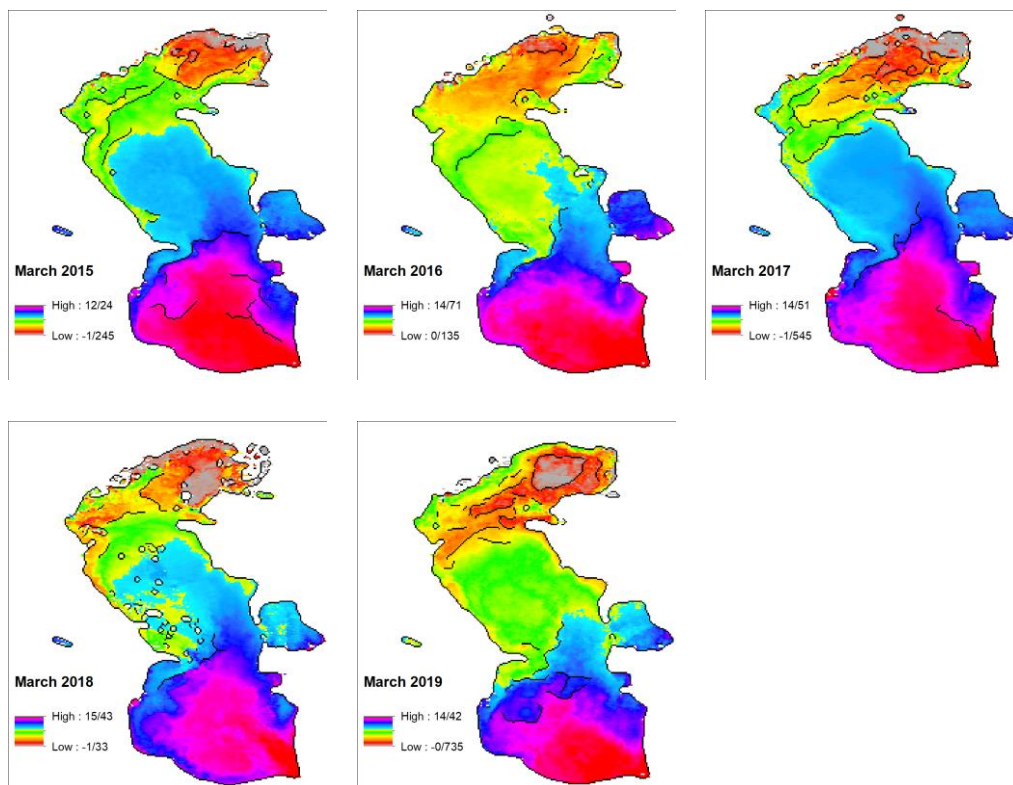




شکل (۳): جبهه‌های دمایی شناسایی شده با روش کنی در ماه نوامبر سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹

Fig (3): Sea surface temperature fronts detected by Kenny's algorithm in November from 2015 to 2019

در دوره پیش‌تابستانی، به‌صورت پراکنده و متعدد، انواع جبهه‌های طولی، منسجم، شاخه‌ای و گسسته دیده می‌شود. جبهه‌های ساحل آذربایجان در فوریه، از جمله جبهه‌های پایدار و پرتکرار در این مدت پنج ساله بررسی است. در ماه مارس نیز جبهه‌های سواحل روسیه، در تمام مدت این پنج سال مشاهده شد، اما در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ منسجم‌تر و در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ پراکنده‌تر بودند. در ماه می، جبهه‌های متعددی در سواحل جنوبی خزر شکل گرفت. در (شکل ۴) جبهه‌های دمایی شناسایی شده با روش کنی در ماه مارس سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ نشان داده شده است.

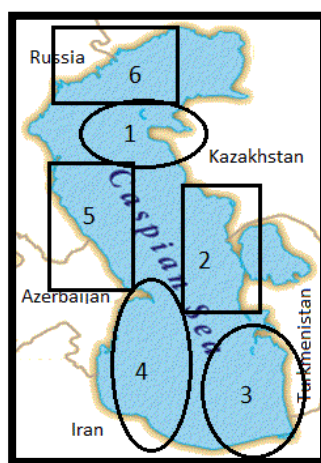


شکل (۴): جبهه‌های دمایی شناسایی شده با روش کنی در ماه مارس سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹

Fig (4): Sea surface temperature fronts detected by Kenny's algorithm in March from 2015 to 2019

۳-۲- مقایسه مکانی جبهه‌ها

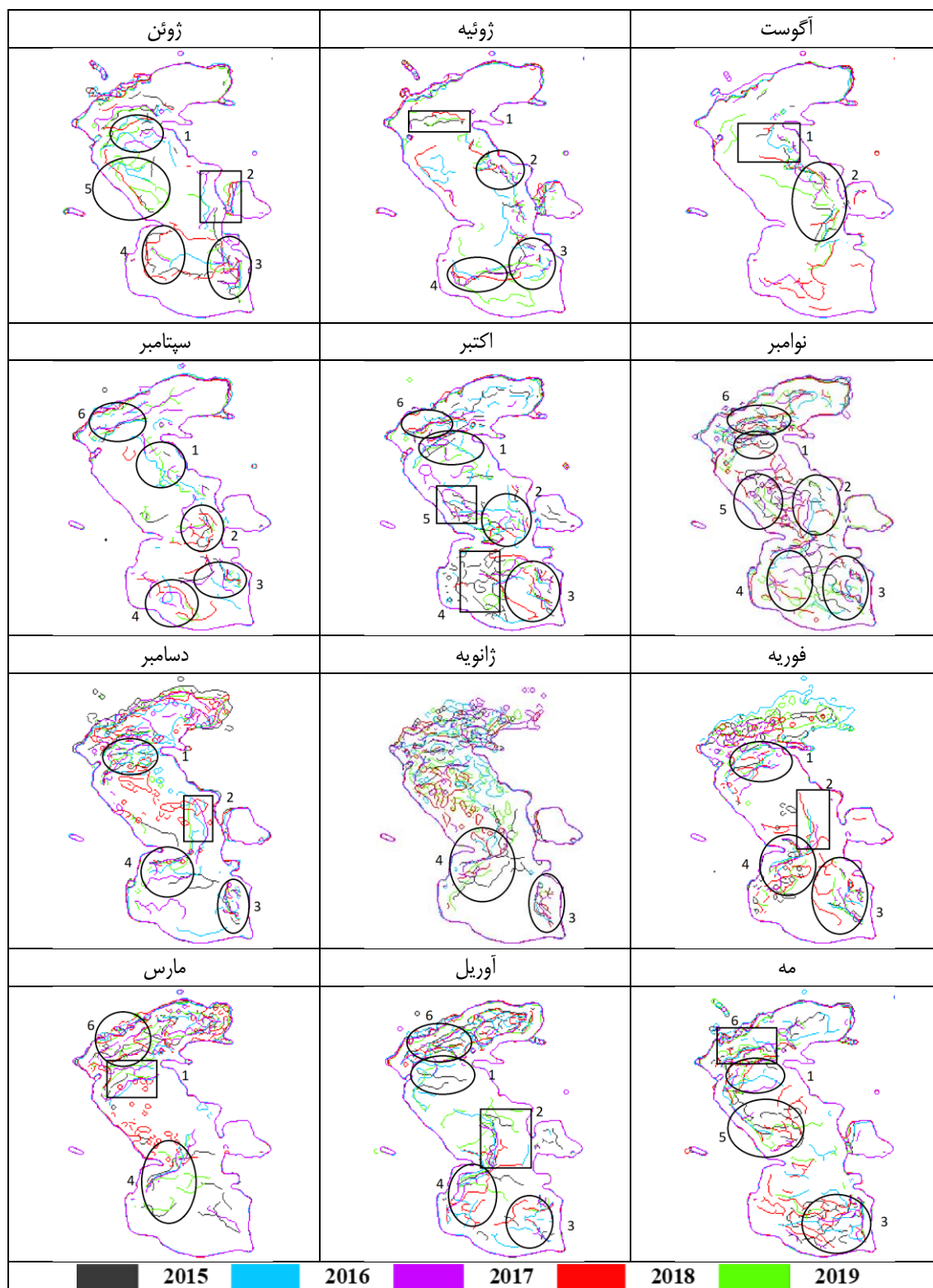
از بررسی جبهه‌های دمایی شناسایی شده با الگوریتم کنی، شش منطقه اصلی برای جبهه‌های پایدار ماهانه شناسایی شد که در (شکل ۵) ارائه شده است. در منطقه ۱، در بیشتر ماه‌های سال بجز ژانویه جبهه‌های دما شکل می‌گیرند. جبهه‌های منطقه ۱، جبهه‌های پایدار ساحلی در طی سال محسوب می‌شوند. جبهه‌های دمایی منطقه ۲ به‌طور کلی حضور مستمری در طی سال نداشته و پس از شکل‌گیری در ماه می تا دسامبر باقی مانده و پس از آن به‌صورت پراکنده شکل می‌گیرند. تنها حضور مستمر جبهه‌ها در منطقه ۳، ماه مارس است. در منطقه ۴ جبهه‌ها بجز در ماه آگوست، به‌صورت پایدار شناسایی شدند. در منطقه ۵، جبهه‌های دمایی در سپتامبر شکل گرفته و در ماه‌های اکتبر و نوامبر به‌طور پیوسته دیده می‌شوند. جبهه‌های دمایی منطقه ۶، در دو دوره سه ماهه سپتامبر تا نوامبر و مارس تا می حضور پایدار داشته و در مابقی سال به صورت پراکنده و گسسته شناسایی شدند.



شکل (۵): مناطق جبهه‌های دمایی شناسایی شده توسط الگوریتم کنی.

Fig (5): Zoning of sea surface temperature fronts detected by Kenny's algorithm.

در (شکل ۶)، جبهه‌های دمایی ماهانه مستخرج با الگوریتم کنی به تفکیک سال و مناطق شش‌گانه، نشان داده شده است. همچنین در (جدول ۱) نیز جزئیات این جبهه‌های دمایی ارائه شده است.



شکل (۶): جبهه‌های دمایی شناسایی شده توسط الگوریتم کنی به تفکیک سال و مناطق شش‌گانه

Fig (6): Sea surface temperature fronts separated by year and region

جدول (۱): وضعیت و شرایط حضور ماهانه جبهه‌های دمایی دریای خزر

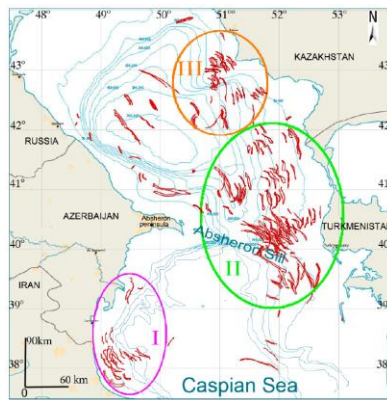
Table (1): Conditions of the monthly presence of sea surface temperature fronts in the Caspian Sea

| منطقه ۱ | منطقه ۲ | منطقه ۳ | منطقه ۴ | منطقه ۵ | منطقه ۶ |
|-----------|-------------------|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| حضور | غیرمستمر | حضور | حضور | بلند، منسجم و ثابت | تکه‌تکه و متغیر مکان |
| حضور | حضور | حضور | بلند، منسجم و ثابت | غیرمستمر | غیرمستمر |
| تکه‌تکه | حضور | عدم حضور | غیرمستمر | عدم حضور | غیرمستمر |
| حضور | حضور | پیدایش | پیدایش | عدم حضور | بلند، منسجم و ثابت |
| حضور | حضور | حضور | تکه‌تکه | تکه‌تکه و متغیر مکان | پایدار و ثابت مکان |
| حضور | حضور | حضور | حضور | حضور | حضور |
| حضور | بلند و منسجم | حضور | تکه‌تکه | نامشهود | تکه‌تکه و متغیر مکان |
| تکه‌تکه و | تکه‌تکه | پایدار و ثابت | حضور | پراکنده و نامشهود | پراکنده و نامشهود |
| حضور | پیدایش و منسجم | حضور | حضور | عدم حضور | پیدایش و تکه‌تکه |
| حضور | عدم حضور | پیدایش و تکه‌تکه | حضور | عدم حضور | حضور |
| حضور | منسجم و دور از | حضور | بلند، منسجم و ثابت | عدم حضور | حضور |
| حضور | پراکنده و نامشهود | غیرمستمر | حضور | پیدایش و تکه‌تکه | حضور |

۴- نتیجه گیری

یکی از پدیده‌های دریای خزر، امواج داخلی است که توسط لاوروا و میتیازینا در سال ۲۰۱۴ بررسی شد و نشان داد که امواج داخلی دریای خزر در سه منطقه اصلی (منطقه A، B و C) متمرکز شده و وقوع آنها وابسته به فصول سال است. این موضوع در (شکل ۷) نشان داده شده است. با پایان یافتن ماه می تا نیمه اول ماه ژوئن، امواج داخلی تنها در قسمت غربی خزر جنوبی شکل می‌گیرند (منطقه A). این درحالی است امواج داخلی در نیمه دوم ژوئن و ژوئیه در شرق دریای خزر (منطقه B) و در آگوست، در شمال شرق دریای خزر شناسایی شد. بیشترین امواج داخلی شناسایی شده مربوط به ماه‌های جولای و آگوست و در شرق دریای خزر شمال آبشرون سیل^۱ است. در بقیه مناطق سطحی دریای خزر، امواج داخلی فراوانی کمتری دارد [۲۵]. با مقایسه امواج داخلی دریای خزر با جبهه‌های دمایی شناسایی شده در این تحقیق، ارتباط بین این دو آشکار شد. امواج داخلی منطقه A را با جبهه‌های دمایی منطقه ۴ می‌توان مقایسه کرد. در منطقه A امواج داخلی پر قدرتی شکل گرفته است. نتایج نیز جبهه‌های دمایی را در ماه‌های ژوئن و ژوئیه در منطقه ۲ (نزدیک ساحل) نشان داد. در منطقه یک که با منطقه C هم‌پوشانی دارد نیز، در بیشتر مواقع سال به‌ویژه آگوست، جبهه‌های دمایی مشاهده شد.

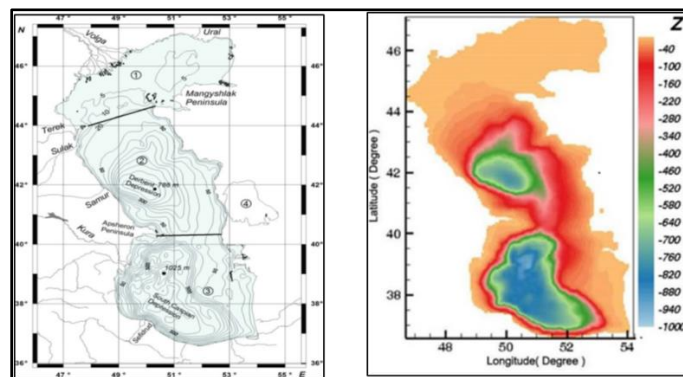
¹ Apsheron Sill



شکل (۷): موقعیت امواج داخلی شناسایی شده در دریای خزر [۲۵]

Fig (7): Location of internal wave detected in Caspian Sea [25]

پدیده فراجوشی نیز یکی از پدیده‌هایی است که بر دمای سطحی آب و جبهه‌های دمایی اثرگذار بوده و غالباً تحت تاثیر شرایط باد، جریان و توپوگرافی بستر شکل می‌گیرد. در تابستان الگوی باد غالب دریای خزر به‌خصوص سواحل شرقی از شمال به سمت جنوب است. همچنین جهت جریانات سواحل شرقی خزر میانی، از ساحل به‌سمت دور از ساحل است. بنابراین پدیده فراجوشی در سواحل شرقی خزر در تابستان شکل می‌گیرد [۲۶]. یکی دیگر از عوامل فراجوشی، توپوگرافی بستر دریا است. این نوع از فراجوشی در مناطقی ایجاد می‌شود که توپوگرافی نواحی ساحلی نامنظم بوده و دارای دماغه یا تپه‌های دریایی باشد. در این مناطق، برخورد جریانات نزدیک بستر با شیب تند ساحل یا تپه دریایی سبب تغییر مسیر و انحراف آنها به سمت بالا شده که به آن فراجوشی وابسته به توپوگرافی گفته می‌شود. با توجه به نقشه عمق‌سنجی دریای خزر که در (شکل ۸) نشان داده شده است، سواحل غربی خزر میانی دارای تغییرات شدیدی در شیب بستر است که مستعد پدیده فراجوشی وابسته به توپوگرافی است [۲۷]. بر این اساس، جبهه‌های شناسایی شده در مناطق کم‌عمق ۳ و ۴ که دارای تغییرات شدید بستر نیز هستند، با مناطق مستعد فراجوشی وابسته به عمق، هم‌پوشانی دارند. تعدادی از جبهه‌های مناطق ۳ و ۴ در (شکل ۹، سمت راست) نشان داده شده است.



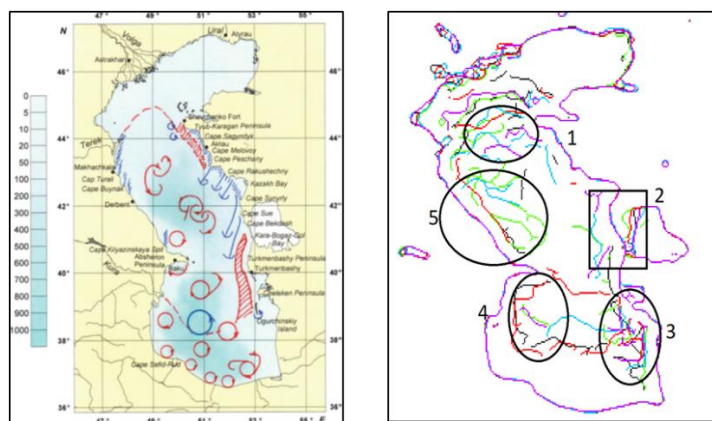
شکل (۸): سمت راست: نقشه عمق‌سنجی [۲۷] و سمت چپ: نقشه خطوط هم‌عمق دریای خزر [۲۸]

Fig (8): Right: bathymetric map [27] and Left: bathymetric contours [28] of Caspian Sea

از دیگر عوامل حرکات قائم (حرکت بالاسو) آب به‌خصوص در نواحی عمیق خزر میانی، وجود گرادیان چگالی است. این گرادیان چگالی بر اثر ورود آب رودخانه‌های عظیمی مانند ولگا و اورال در شمال دریای خزر و همچنین اختلاف دمای

نصف‌النهاری در این دریا ایجاد می‌شود. بر اثر این اختلاف چگالی، آب‌های سرد و چگال خزر شمالی به طرف لایه‌های عمیق‌تر فرورفته و سبب بالا آمدن آب در خزر میانی و جنوبی می‌شود [۲۷]. بنابراین جبهه‌های دمایی شناسایی شده در مناطق ۱ و ۲ در خزر میانی که نمونه‌هایی از آن در (شکل ۹، سمت راست) نشان داده شده، بر اثر تغییرات عمق در این منطقه و همچنین حرکات قائم ناشی از گرادیان چگالی ایجاد شده‌اند.

گردش کلی آب دریای خزر متأثر از عوامل متعدد از جمله جریانات بادرانده سطحی و جریانات ترموهالاین ستون آب است. (شکل ۹، سمت چپ) گردش کلی آب دریای خزر و مناطق مستعد فراجوشی در سواحل شرقی را در دوره گرم سال نشان می‌دهد [۲۹]. به‌طور کلی در دوره زمستان، گردشی پادساعتگرد در خزر میانی و گردشی ساعتگرد در خزر جنوبی فعال هستند. در تابستان تقریباً عکس این حالت اتفاق می‌افتد [۳۰، ۳۱]. این چرخندها و جریانات بالای‌سوی ناشی از آنها از عوامل ایجاد تغییرات سطحی دمای آب و جبهه‌های دمایی است که آشکارسازی جبهه‌های دمایی، ارتباط و تطابق این دو را آشکار کرد. جبهه‌های شناسایی شده در مناطق ۱، ۲ و ۳ که در (شکل ۹، سمت راست) نشان داده شده است نیز با مناطق مستعد فراجوشی هم‌پوشانی دارد.



شکل (۹): سمت راست: منطقه‌بندی جبهه‌های دمایی حاصل از الگوریتم کنی در ماه ژوئن و سمت چپ: گردش تابستانه آب در دریای خزر [۲۹]

Fig (9): Right: Zoning of sea surface temperature fronts in June and Left: Summer Circulation of Caspian Sea [29]

منابع:

1. Belkin I, Shan Z, Cornillon P. Global survey of oceanic fronts from Pathfinder SST and in-situ data. *Eos Trans AGU*. 1998;79(45).
2. Hopkins J, Challenor P, Shaw AG. A new statistical modeling approach to ocean front detection from SST satellite images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010;27(1):173-91.
3. Belkin I, Cornillon P. Bering Sea thermal fronts from Pathfinder data: Seasonal and interannual variability. *Pacific Oceanography*. 2005;3(1):6-20.
4. Einali A, Sadrinasab M, Akbarinasab M. The Arvand River plume Detection by Using Numerical Modelling. *Hydrogeomorphology*. 2022;9(31):174-59.
5. DiGiacomo PM, Hamner WM, Hamner PP, Caldeira RM. Phalaropes feeding at a coastal front in Santa Monica Bay, California. *Journal of Marine Systems*. 2002;37(1-3):199-212.

6. Holligan P. Biological implications of fronts on the northwest European continental shelf. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1981;302(1472):547-62.
7. Jessup DA, Miller MA, Ryan JP, Nevins HM, Kerkering HA, Mekebri A, et al. Mass stranding of marine birds caused by a surfactant-producing red tide. *PLoS One*. 2009;4(2):e4550.
8. Tittensor DP, Mora C, Jetz W, Lotze HK, Ricard D, Berghe EV, et al. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature*. 2010;466(7310):1098-101.
9. Tseng C-T, Sun C-L, Belkin IM, Yeh S-Z, Kuo C-L, Liu D-C. Sea surface temperature fronts affect distribution of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the Northwestern Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2014;107:15-21.
10. Belkin I, Cornillon P. Surface thermal fronts of the Okhotsk Sea. *Pacific Oceanography*. 2004;2(1-2):6-19.
11. Kosarev AN. Physico-geographical conditions of the Caspian Sea. *The Caspian Sea Environment*. 2005:5-31.
12. Zonn IS, Kosarev AN, Glantz MH, Kostianoy AG. *The Caspian Sea Encyclopedia*: Springer; 2010.
13. Hashemi SN, Akbarinasab M, Safarrad T. The Detection of the Plume of the Arvand River Using Satellite Images. *Hydrogeomorphology*. 2018;4(13):147-64.
14. Us Department of Commerce NO, Atmospheric A. Why do scientists measure sea surface temperature? 2021 [Available from: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/sea-surface-temperature.html>].
15. Nasa Earth Observatory. Sea Surface Temperature: NASA Earth Observatory; 2018 [Available from: <https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MYD28M>].
16. Wagawa T, Kawaguchi Y, Igeta Y, Honda N, Okunishi T, Yabe I. Observations of oceanic fronts and water-mass properties in the central Japan Sea: Repeated surveys from an underwater glider. *Journal of Marine Systems*. 2020;201:103242.
17. Saldías GS, Lara C. Satellite-derived sea surface temperature fronts in a river-influenced coastal upwelling area off central-southern Chile. *Regional Studies in Marine Science*. 2020;37:101322.
18. Belkin IM, O'Reilly JE. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery. *Journal of Marine Systems*. 2009;78(3):319-26.
19. Lin L, Liu D, Luo C, Xie L. Double fronts in the Yellow Sea in summertime identified using sea surface temperature data of multi-scale ultra-high resolution analysis. *Continental Shelf Research*. 2019;175:76-86.
20. Sarma V, Desai D, Patil J, Khandeparker L, Aparna S, Shankar D, et al. Ecosystem response in temperature fronts in the northeastern Arabian Sea. *Progress in Oceanography*. 2018;165:317-31.
21. Karami H, Akbarinasab M, Safarad T. Detection coastal thermal fronts in the Persian Gulf and the Oman Sea using MODIS images. 2018.
22. Puthethath AS. Identification of thermal fronts in the Arabian sea using MODIS-SST data. *Kerala University Of Fisheries And Ocean Studies Panangad*. 2014.
23. Wall CC, Muller-Karger FE, Roffer MA, Hu C, Yao W, Luther ME. Satellite remote sensing of surface oceanic fronts in coastal waters off west-central Florida. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(6):2963-76.
24. Ren S, Zhu X, Drevillon M, Wang H, Zhang Y, Zu Z, et al. Detection of SST fronts from a high-resolution model and its preliminary results in the south China sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2021;38(2):387-403.
25. Lavrova O, Mityagina M. Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas. *Remote Sensing*. 2017;9(9):892.
26. Shiea Ali M, A. A. Bidokhti AA. The study of upwelling in the eastern coast of the Caspian Sea using numerical simulation. *Journal of the Earth and Space Physics*. 2015;41(3):535-45.
27. Mansoury D, Sadrasab M, Akbarinasab M. Seasonal and annual variability in wind fields and circulation of surface waters of the Caspian Sea. *Journal of Marine Science and Technology*. 2018;17(1):68-82.
28. Kostianoy AG, Ginzburg AI, Lavrova OY, Lebedev SA, Mityagina MI, Sheremet NA, et al. Comprehensive satellite monitoring of Caspian Sea conditions. *Remote sensing of the Asian Seas*. 2019:505-21.
29. Lavrova OY, Mityagina M, Sabinin K, Serebryany A. Satellite observations of surface manifestations of internal waves in the Caspian Sea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011;47:1119-26.

30. Gunduz M, Özsoy E. Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea. *Ocean Science*. 2014;10(3):459-71.
31. Kara AB, Wallcraft AJ, Metzger EJ, Gunduz M. Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea. *Continental Shelf Research*. 2010;30(10-11):1211-25.

Detection of The Caspian Sea Surface Temperature Fronts by Remote Sensing

Shahnaz Kaleji¹, Mohammad Akbarinasab^{*2}, Abbas Einali³

1- Physical Oceanography Department, Faculty of Environmental and Marine Sciences, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran.

ABSTRACT

A sea temperature front that is a narrow-width area with a high-temperature gradient has important roles in biological, chemical, physical, and agricultural parameters and climate change issues. Detection of Sea surface temperature front is usable for other phenomena understanding such as upwelling, eddy, and biological accumulation. So, in this study, the Caspian Sea surface temperature fronts in 5 years from 2015 until 2019 have been investigated by satellite images (Modis). For this purpose, the Canny algorithm was used in the MATLAB environment. The detected fronts were compared spatially and temporarily (each year was divided into three periods with four months) with each other. The results show that the fronts in the north of the Caspian Sea are permanent from September until November and March until May, and other times of year are impermanent and dashed. In the east of the south Caspian Sea, detected fronts in only March month repeated annually, while, in the west of the south Caspian Sea, in all months except for August, fronts were detected all five years. The pattern of temperature fronts in the east and west of the Middle Caspian Sea is different. In winter, the fronts are clustered, but in summer, are coherent and clear. Also, the southern Caspian Sea temperature fronts in the pre-summer period are less abundant than in other periods. In general, the detected fronts are related and consistent with the location of internal waves, steep areas near the coast, and the circulation pattern of the Caspian Sea.

KEYWORDS: Sea Surface Temperature, Modis, Canny Algorithm, Caspian Sea

ARTICLE TYPE

Original Research

ARTICLE HISTORY

Received: 1 Aug 2023

Accepted: 23 Nov 2023

ePublished: 6 Dec 2023

* Corresponding Author:

Email address: m.akbarinasab@umz.ac.ir

Tel:

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513