

بررسی خواص فیزیکی و امواج بلند ساحلی خزر جنوبی

جواد باباگلی^{۱*}، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲، و زهرا سلمانی قزوینی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، فیزیک دریا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، فیزیک دریا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، فیزیک دریا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷)

چکیده

این پژوهش به بررسی پارامترهای فیزیکی آب‌های حوزه خزر جنوبی و امکان رخداد امواج کلون ساحلی در دریای خزر به کمک داده‌های ADCP، CTD، داده‌های هواشناسی، تراز سطحی و تصاویر ماهواره‌ای می‌پردازد. بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشترین اثرپذیری ساختار چینه‌بندی حوزه جنوبی به دلیل تغییرات دمایی در این حوزه است و عامل شوری نقش کلیدی بازی نمی‌کند. ترموکلاین فصلی در حدود دو ماه از سال (بهار و اسفند) در این حوزه ناپدید می‌شود و دوباره با گرم شدن هوا توسعه می‌یابد. داده‌های دستگاه سرعت‌سنجی نشان می‌دهد که در این حوزه، بیشتر از مؤلفه u سرعت بیشتر از مؤلفه v سرعت است و تا حدود دو برابر هم می‌رسد. منحنی چگالی طیفی سرعت‌سنجی نشان می‌دهد که در این حوزه، بیشینه‌های چند ساعته تا چند روزه وجود دارند. در این پژوهش بیشینه‌هایی با دوره‌های ۳۰، ۴۰، ۴۸ و ۶۰ ساعت جزء امواج کلون محسوب می‌شوند. در گام بعد، با بررسی داده‌های تراز سطحی، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های باد، دیده شد که بیشینه‌های گفته‌شده درباره امواج کلون، در بیشینه‌های چگالی طیفی باد و تراز سطحی هم مشاهده می‌شوند. امواج کلون دو مد باروتروپیک و باروکلینیک دارند ولی به احتمال زیاد، مد باروکلینیک در این حوزه از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای مد باروکلینیک، شعاع تغییر شکل راسی حدود ۲۰ کیلومتر و سرعت گروه حدود ۱/۲ متر بر ثانیه تخمین زده شده است. شایان ذکر است که با توجه به این دوره‌ها، طول موج امواج در خزر جنوبی از ۱۲۹ تا ۲۵۹ کیلومتر متغیر بود که این موضوع با تصاویر ماهواره‌ای Aviso همخوانی نسبتاً خوبی دارد.

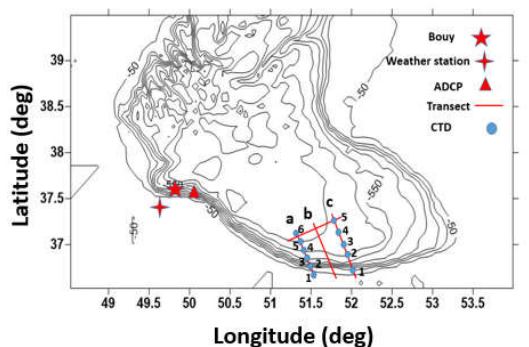
واژه‌های کلیدی: خزر جنوبی، داده‌های میدانی، تغییرپذیری پارامترهای اقیانوس‌شناسی، امکان‌سنجی وقوع امواج کلون ساحلی، صحت‌سنجی

۱ مقدمه

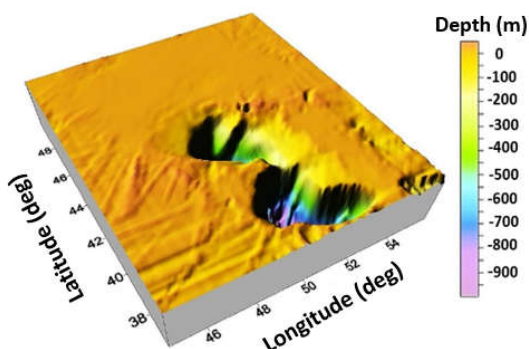
(حاجی‌زاده و غفاری، ۱۳۸۵)، بررسی فرایند جریان‌های تبادل‌ی به کمک داده‌های مشاهداتی (فرانسکی و همکاران، ۲۰۰۳)، بررسی ساختار ترموهالاین و گردش جریان در دریای خزر (توزیلکین و کاساریو، ۲۰۰۵)، مطالعه تغییرات دمای سطحی و ترموکلاین فصلی در دریای خزر (کاسارو و همکاران، ۲۰۰۵)، بررسی اثرهای ورودی آب شیرین در تغییرات فصلی، شوری سطحی و شکل‌گیری جریان‌ها در دریای خزر (کارا و همکاران، ۲۰۱۰)، مدل‌سازی گردش‌های سطحی و ساختار ترموهالاینی در دریای خزر (گوندوز و اوزی، ۲۰۱۴)، بررسی آلودگی نفتی در خزر شمالی (لیتوچنکو و ایوانوف، ۲۰۰۸)،

دریای خزر با توجه به ناهمواری‌های بستر، به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود. تنگه آبشوران، حوزه جنوبی را از دو حوزه دیگر متمایز می‌کند (شکل ۱-ب). این دریا از حیث توپوگرافی بسیار متغیر است. حداکثر عمق دریا در خزر شمالی ۲۰ متر است اما در خزر جنوبی، نزدیک سواحل ایران، به ۱۰۲۵ متر می‌رسد (ردیونوف، ۲۰۱۲). حوزه خزر شمالی حدود یک درصد و حوزه خزر جنوبی حدود دوسوم آب خزر را در خود جای داده‌اند (بایدین و کسارو، ۱۹۸۶). شکل کشیده دریاچه در راستای شمالی- جنوبی، موجب تنوع دمایی این دریاچه (دریا) شده است اما تغییرات شوری این دریاچه ناچیز است (ترزویو و همکاران، ۱۹۹۲). محصور بودن از یک سو و رشد برداشت نفت از بستر این دریا در سال‌های اخیر توسط کشورهای واقع در خزر شمالی و میانی از سوی دیگر، سبب توجه بیش از پیش به این دریا از نظر آلودگی‌های نفتی شده است. با توجه به این ویژگی‌ها پژوهشگران سعی کردند از نگاه‌های متفاوت (زیست‌شناسی، شیمی و فیزیک دریا) به این دریاچه نگاه کنند ولی اغلب این پژوهش‌ها به خلأ داده‌های مشاهداتی مناسب و جامع اذعان دارند. به همین دلیل، بیشتر پژوهش‌ها متمایل به مدل‌های عددی است اما آنها هم در تحلیل نتایج مدل‌های عددی و در مرحله اعتبارسنجی مدل خود، با مشکل نبود داده‌های مشاهداتی روبه‌رو می‌شوند.

با وجود همه این کمبودها، مطالعه دریای خزر برای پژوهشگران ایران و دیگر کشورها موضوعی مهم است و پژوهش‌هایی نیز در این زمینه اجرا شده است. برای نمونه می‌توان به بررسی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در سراسر سواحل جنوبی خزر (چابک‌سوار و ترابی آزاد، ۱۳۷۶)، بررسی نقش امواج درونی در ایجاد ساختار لایه‌ای (شکر باغانی و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۸۴)، بررسی ساختار دمایی فلات قاره سواحل جنوبی دریای خزر



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) منطقه مورد مطالعه، موقعیت دستگاه‌های ADCP و CTD، بویه ترازسنجی سطح و ایستگاه هواشناسی بندر انزلی. از بیست‌وهفت ایستگاه اندازه‌گیری داده‌ها، تنها یازده ایستگاه در شکل مشخص شده است. (ب) توپوگرافی دریای خزر. شکل‌ها با استفاده از داده‌های GEBCO با تفکیک نیم‌دقیقه‌ای رسم شده‌اند.

۲ داده‌ها و تجزیه و تحلیل آنها

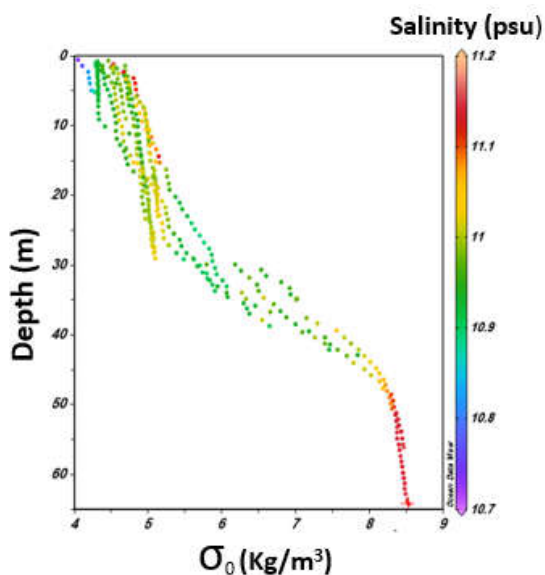
۱-۲ داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش، شامل داده‌های اندازه‌گیری شده در خزر جنوبی در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ است. اندازه‌گیری‌های CTD (با استفاده از مدل Ocean Seven 316) مربوط به ماه‌های اکتبر، اوت و آوریل سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴، در بیست‌وهفت ایستگاه و در چهار مقطع است (شکل ۱-الف). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، سه مقطع a، b و c عمود بر ساحل هستند و مقطع چهارم به موازات ساحل است. در این پژوهش، از داده‌های ADCP حاصل از اندازه‌گیری فاز سوم پژوهشگاه اقیانوس‌شناسی و علوم جوی در بخش غربی جنوب دریای خزر (در آب‌های استان گیلان، حد فاصل دهانه سپیدرود و بندر انزلی) در فاصله زمانی نوامبر ۲۰۰۴ (آبان ۱۳۸۳) تا مه ۲۰۰۵ (اردیبهشت ۱۳۸۴) استفاده شد. اندازه‌های میدانی جریان، توسط جریان‌سنج RCM9 در سه مورینگ در عرض فلات‌قاره در نقاطی به عمق ۲۰، ۵۰ و ۲۰۰ متر، اندازه‌گیری و هر ۲۰ دقیقه به ثبت رسیده‌اند (شکل ۱-الف). داده‌های هواشناسی استفاده شده در این پژوهش مربوط به ایستگاه هواشناسی ساحلی بندر انزلی (شکل ۱-الف) است. شایان ذکر است که داده‌های مربوط به سرعت و جهت باد هر سه ساعت ثبت شده است. داده‌ها در همان زمان جمع‌آوری به‌وسیله جریان‌سنج، بررسی شدند تا تحلیل‌ها به واقعیت نزدیک‌تر باشد. از آنجاکه داده‌های تراز سطح در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ موجود نبود، داده‌های تراز سطحی مورد استفاده، مربوط به بویه بندر انزلی سازمان سواحل و بنادر از فروردین ۱۳۹۲ تا اسفند ۱۳۹۲ است. در این پژوهش برای درک تغییرات سطح دریای خزر، از تصاویر ماهواره‌ای نیز استفاده شده است که این تصاویر از سایت نوآ (<http://las.pfeg.noaa.gov/oceanwatch/oceanwatch.php>) مربوط به سنجنده AVISO استخراج شده است.

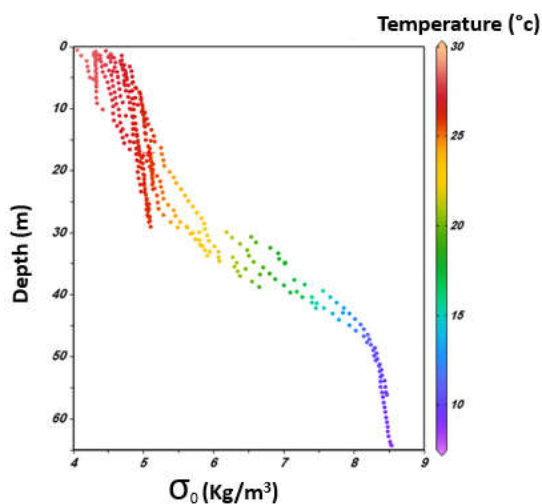
مطالعه یخ‌ها (تمیمی و همکاران، ۲۰۱۱) و بررسی جریان سطحی با کمک داده‌های ماهواره‌ای (گوندوز، ۲۰۱۴) اشاره کرد. در این پژوهش‌ها، بیشترین تمرکز روی سطح بوده است ولی در برخی پژوهش‌ها به اثر خاص توپوگرافی خزر جنوبی بر جریانات دریای خزر اشاره شده است؛ برای مثال می‌توان به تأثیر توپوگرافی بر تغییرات جریانات دریای خزر (غفاری و همکاران، ۲۰۱۳) و مطالعه جریان آب عمیق در خزر جنوبی ناشی از به‌دام‌افتادن جریان آب چگال در اثر توپوگرافی (باباگلی و همکاران، ۲۰۱۷) اشاره کرد.

پژوهش حاضر سعی می‌کند با کمک داده‌های میدانی و ماهواره‌ای، به مطالعه دریای خزر جنوبی بپردازد. این پژوهش به دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول خواص فیزیکی آب‌های خزر جنوبی بیان می‌شود و در بخش دوم، نتایج با کمک داده‌های سرعت‌سنجی و تحلیل‌های فیزیکی، بررسی می‌شوند. سپس به مطالعه امواج کلونین و امکان رخداد آن در خزر جنوبی پرداخته می‌شود. برای نیل به این هدف، از نتایج بخش اول این پژوهش استفاده خواهد شد. در ادامه، به کمک داده‌های تراز سطح و داده‌های ماهواره‌ای، وجود امواج کلونین ساحلی خزر جنوبی بررسی می‌شود. شایان ذکر است که موج کلونین (موج گرانی به‌دام‌افتاده)، موجی است با دوره‌تناوب بلند و دامنه کوتاه که موازی با یک مرز ثابت مانند یک کانال عریض یا یک خط ساحلی حرکت می‌کند. موج کلونین در سواحل، ناشی از اثر کوریولیس و در منطقه استوایی، ناشی از صفر شدن پارامتر کوریولیس در استوا است که گاهی منجر به بروز پدیده‌های جوی-اقیانوسی در حرکات جو و اقیانوس (مثل پدیده النینو) می‌شود. بنابراین دو نوع موج کلونین داریم (علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۸۳ و والیس، ۲۰۰۶) که در این مقاله، نوع ساحلی آن بررسی می‌شود.

دیگر این است که در اواخر آذرماه، به طور ناگهانی، به مدت پانزده تا بیست روز، دمای آب در عمق ۲۰۰ متری خزر جنوبی افزایشی غیرمعمول دارد.



(الف)

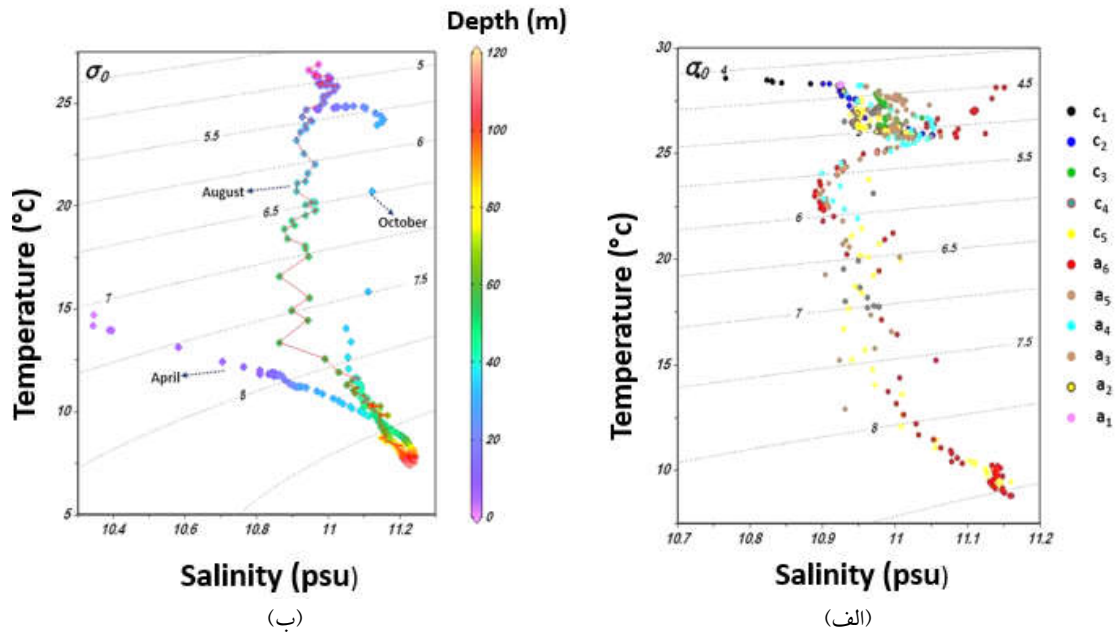


(ب)

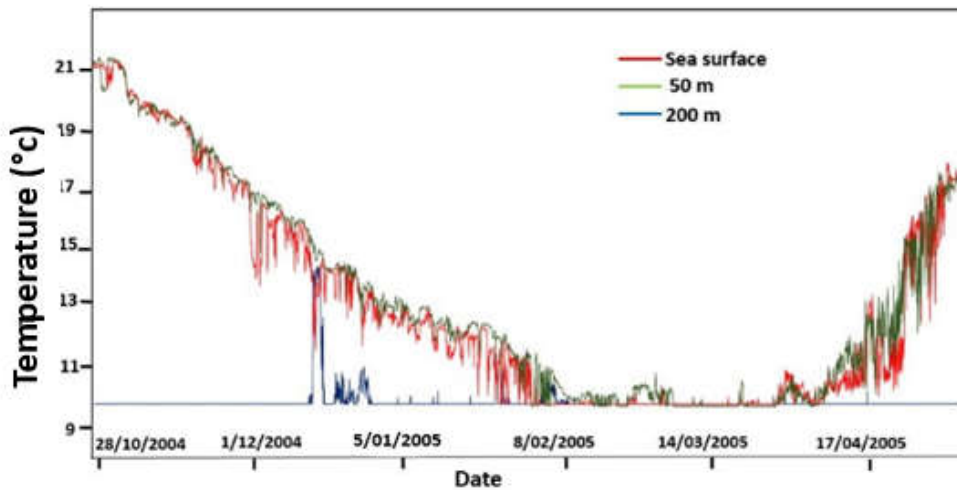
شکل ۲. نمودار چگالی برحسب عمق در ماه اوت براساس داده‌های تمام ایستگاه‌های روی مقاطع a و c (شکل ۱-الف). رنگ‌ها نشان‌دهنده (الف) تغییرات شوری و (ب) تغییرات دما هستند. ایستگاه‌های مختلف در شکل ۳ مشخص شده‌اند.

۲-۲ بررسی خواص فیزیکی آب

برای درک خواص فیزیکی و ساختار آب‌های سواحل ایران، ساختار دمایی، شوری و چگالی برحسب عمق برای ایستگاه‌های مختلف (شکل ۱-الف) نشان داده شده است (شکل ۲). در گام بعد، منحنی T-S برای ستون شاره ترسیم شده است (شکل ۳) که در درک خط اختلاط دو نوع آب بسیار مهم است. با توجه به مقاطع عمقی، به دلیل تغییرات دمایی جو، تغییرات ساختار دمایی در ماه‌های مختلف به ویژه در سطح متفاوت است ولی تغییرات شوری چندان شدید نیست. بیشینه تغییرات شوری از سطح تا عمق از ۰/۲۲ تا ۰/۲۷ واحد شوری متغیر است. عمق لایه آمیخته در ایستگاه‌های مختلف در فصل تابستان که با روش گرادیان محاسبه شده است، حدود ۳۰ متر است و وجود یک ترموکلاین قوی فصلی به پهنای حدود ۲۵ متر، در اعماق ۲۵ تا ۵۰ متر مشهود است. لایه ترموکلاین در فصل پاییز حدود ۱۵ متر و در عمق ۳۰ تا ۴۵ متری است. با دقت در منحنی T-S این نکته حائز اهمیت است که با وجود اینکه ایستگاه‌های a₁ و c₁، نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به سواحل ایران هستند، در ایستگاه c₁ چگالی کمتر است تا حدی که چگالی آب‌های سطحی این ناحیه به حدود ۱۰۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب می‌رسد. مطالعه مقاطع عمقی دما، شوری و چگالی نشان می‌دهد که تغییرات چگالی با تغییرات دما بسیار هماهنگ است ولی شوری در این ساختار اثر کمتری دارد؛ از این رو، سعی شده است با استفاده از داده‌های ADCP، تغییرات دما با دقت بیشتری بررسی شود. در سری زمانی شکل ۴ که چگونگی تغییرات فصلی لایه ترموکلاین در خزر جنوبی را به طور دقیق نشان می‌دهد، دو نکته جالب توجه وجود دارد. نخست اینکه در اواخر فصل زمستان لایه ترموکلاین ناپدید می‌شود (از اواسط بهمن تا اواخر اسفند). نکته مهم



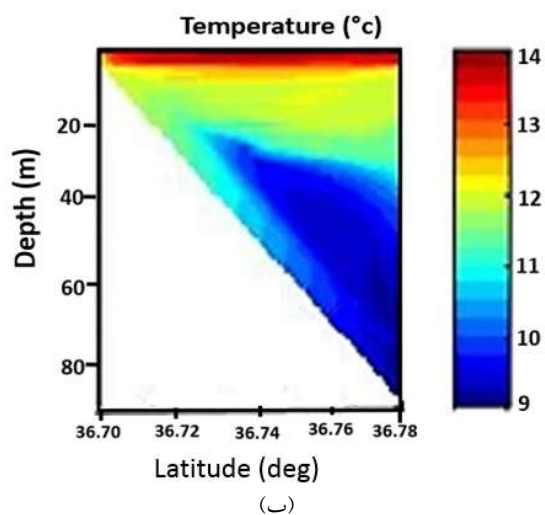
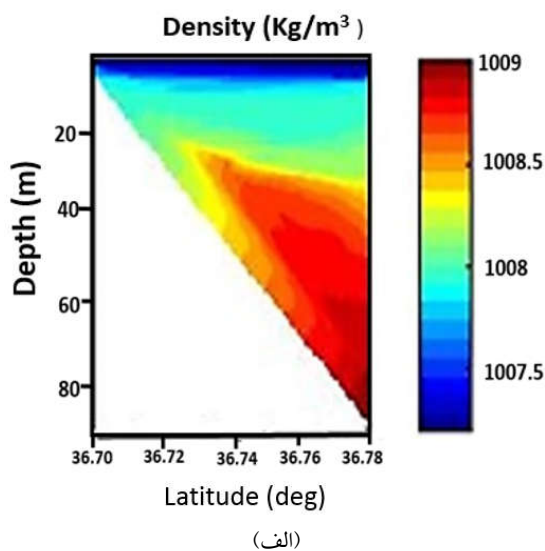
شکل ۳. منحنی T-S برای آب‌های خزر جنوبی. (الف) ماه اوت. در سمت راست شکل، ایستگاه‌ها با رنگ‌های مختلف، متمایز شده‌اند (به‌طور مثال، a_1 یعنی مقطع a ، ایستگاه شماره ۱). (ب) ماه‌های اکتبر، آوریل و اوت. رنگ‌های مختلف، عمق آب را نشان می‌دهند. برای ماه اوت نقاط این نمودار با خط به هم متصل شده‌اند. نقاط واقع در سمت چپ خط مزبور، مربوط به ماه آوریل و نقاط سمت راست مربوط به ماه اکتبر است.



شکل ۴. سری زمانی تغییرات دما (از ماه نوامبر تا ماه مه) براساس داده‌های ADCP در سه عمق مختلف نزدیک سطح (قرمز، ۵۰ متر (سبز) و ۲۰۰ متر (آبی)).

سرعت‌های ثبت شده توسط ADCP استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل این نمودارها به نتایج جالبی منجر می‌شود. نکته مهم این است که در همه عمق‌ها، اندازه مؤلفه u سرعت بیشتر از مؤلفه v است و تا حدود یک متر بر ثانیه هم می‌رسد. البته در برخی زمان‌ها، سرعت u حدود دو برابر سرعت v است. با تحلیل نمودارها در شکل ۶ مشخص می‌شود که در همه عمق‌ها، ستون شماره بیشتر رفتار باروتروپیک از خود نشان می‌دهد (اگرچه در

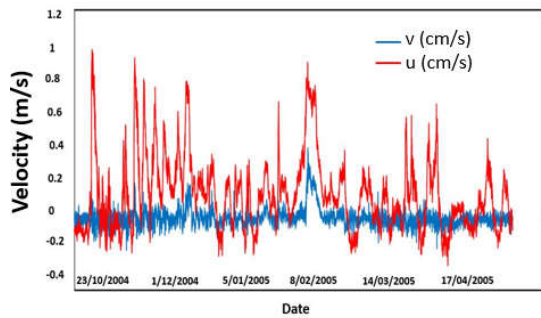
برای درک درست‌تری از ساختار دما، شوری و چگالی در منطقه مورد مطالعه، مقاطع عمقی زده شده است. این مقاطع، شیب‌های موجود در پربندهای (کنتورهای) چگالی، میزان اثرپذیری شیب پربندهای چگالی از تغییرات دما و رفتار باروکلینیکی خطوط هم‌چگالی را در منطقه نشان می‌دهند. شایان ذکر است که در سیال باروکلینیکی، خطوط هم‌فشار و هم‌چگالی با یکدیگر زاویه می‌سازند که این مهم در شیب‌دار بودن خطوط هم‌چگالی در شکل ۵ دیده می‌شود. در این نواحی، به‌ویژه در سواحل غربی (مقطع عمقی a در شکل ۱-الف) و سواحل شرقی (مقطع عمقی c در شکل ۱-الف)، رواناب‌های رودخانه‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. سرخ‌رود و بابل‌رود دو رودخانه ورودی مهم به خزر هستند که این مهم به‌وضوح در مقاطع عمقی مشاهده می‌شود. آب‌های گرم و شور این ناحیه که از رودخانه‌ها جاری می‌شوند به‌دلیل چگالی کم، روی آب‌های دریای خزر شناور می‌مانند و با حرکت به سمت شمال خزر، از شدت نفوذ آنها کاسته می‌شود.



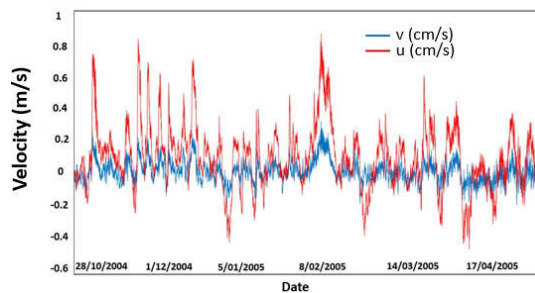
شکل ۵. الف) مقطع عمقی چگالی و ب) مقطع عمقی دما در امتداد خط b (شکل ۱-الف) در فصل تابستان.

۲-۳ بررسی جریان‌ها

در این بخش به کمک داده‌های ADCP، نمودار تغییرات مؤلفه u و v سرعت برحسب زمان در دو عمق ۵۰ و ۲۰۰ متر رسم شده است (شکل ۶). در شکل ۷-ب، تغییرات سرعت برحسب عمق در زمان‌های مختلف ثبت داده‌ها نشان داده شده است. گفتنی است سرعت سنج در یک عمق ثابت واقع است ولی در عمق‌های دیگر هم داده ثبت کرده است؛ به‌همین دلیل می‌توان تغییرات سرعت را رسم کرد. برای داشتن درک درست‌تری از فراوانی سرعت در جهت‌های مختلف، منحنی گل‌جریان در شکل ۷-الف، رسم شده است. شکل ۸، منحنی چگالی طیفی مؤلفه‌های سرعت را نشان می‌دهد که از آن برای تحلیل نتایج



(الف)



(ب)

شکل ۶. نمودار سری زمانی تغییرات مؤلفه‌های سرعت از ماه نوامبر تا ماه مه، (الف) در عمق ۵۰ متری و (ب) در عمق ۲۰۰ متری. نمودارها به کمک داده‌های ADCP رسم شده‌اند.

۴-۲ دینامیک امواج کلونین

معادلات حاکم بر امواج بلند شامل معادلات تکانه و معادله پیوستگی (معروف به معادلات آب کم عمق خطی شده) به صورت زیر است (علی اکبری بیدختی، ۱۳۸۳ و گیل، ۱۹۸۲):

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + H_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0,$$

این معادلات برای امواج کلونین ساحلی عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + H_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0,$$

شکل‌های ۵-الف و ۷-ب، رفتارهای باروکلینیکی نیز دیده می‌شوند. شایان ذکر است که در سیال باروتروپیک، خطوط هم‌فشار و هم‌چگالی با هم زاویه نمی‌سازند و از این رو، چینه‌بندی سرعت وجود ندارد؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، رفتار مؤلفه‌های سرعت در عمق‌های مختلف شباهت زیادی با هم دارد. با توجه به گل جریان می‌توان نتیجه گرفت بیشتر جریان‌های ثبت شده به سمت شرق و جنوب شرقی و با سرعت‌های بین صفر تا پنجاه سانتی‌متر بر ثانیه هستند. با توجه به نمودار چگالی طیفی، مقادیر بیشینه منحنی و به کمک آن، دوره و سرعت زاویه‌ای محاسبه شده است. دوره‌های غالب منحنی ۶، ۱۱، ۲۴، ۳۰، ۴۰، ۴۸، ۶۰، ۱۹۲ و ۲۶۴ ساعت است که از شش ساعت تا حداکثر ۱۱ روز را شامل می‌شود. از آنجا که هر پدیده فیزیکی دوره‌های خاصی دارد، رخداد‌های احتمالی هر پدیده در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این جدول، احتمال وقوع امواج کلونین در خزر جنوبی بسیار زیاد است. توپوگرافی و شکل سواحل خزر جنوبی این احتمال را تقویت می‌کند. در بخش ۲-۶، مستندات برای تقویت این دیدگاه ارائه می‌شود. نکته مهم دیگر، وجود دوره‌های ۱۹۲ و ۲۶۴ ساعته است که احتمالاً مربوط به واداشتهای همدیدی هستند؛ از این رو، در بخش ۲-۵، به کمک داده‌های باد، این مهم بررسی می‌شود.

جدول ۱. دوره تناوب غالب، سرعت زاویه‌ای و رخداد احتمالی براساس دوره تناوب.

T(h)	$\omega(\text{rad/s}) \times 10^{-6}$	رخداد احتمالی
۶	۲/۹	نسیم دریا
۱۱	۱/۵	نسیم دریا و جزرومد
۲۴	۰/۷۲	جزرومد
۳۰	۰/۵۸	امواج کلونین
۴۰	۰/۴۳	امواج کلونین
۴۸	۰/۳۶	امواج کلونین
۶۰	۰/۲۹	امواج کلونین
۱۹۲	۰/۰۹۱	واداشت همدیدی
۲۶۴	۰/۰۶۶	واداشت همدیدی

با در نظر گرفتن حل سینوسی و با توجه به اینکه در حل این معادله، میرایی از طرف ساحل به طرف دریا خواهد بود، معادله شیب سطح دریا یا معادله موج کلون عبارت است از:

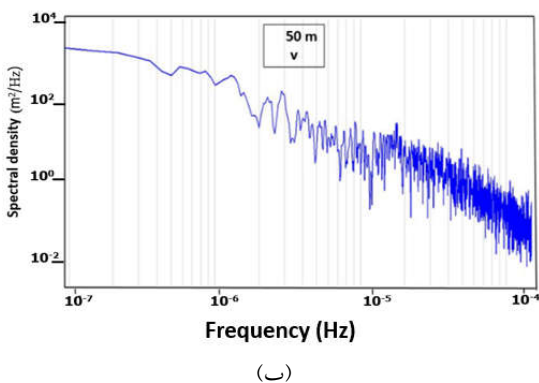
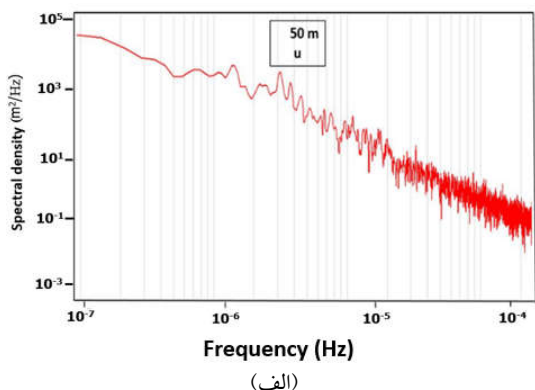
$$\frac{d\eta_0}{dy} + \frac{f}{c}\eta_0 = 0, \quad (۴)$$

حل معادله فوق به صورت زیر است:

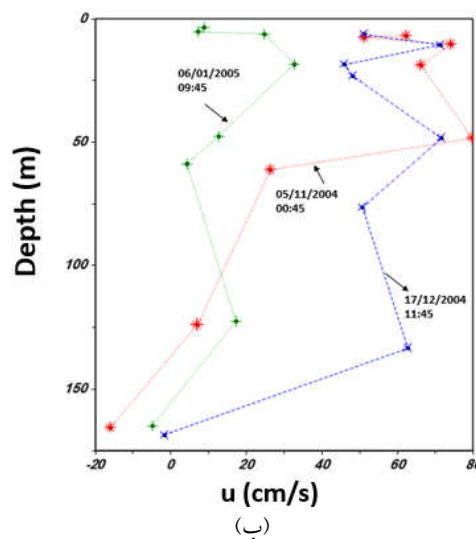
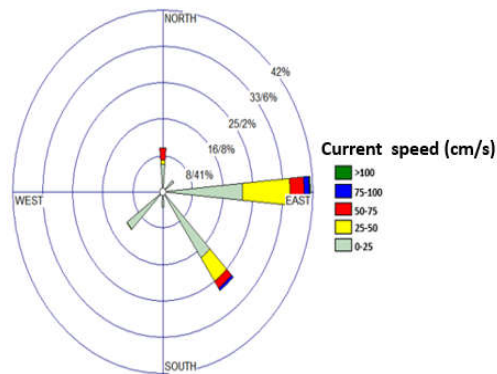
$$\eta_0 = A_0 e^{-y/R},$$

$$\eta = A_0 e^{-y/R} \cos(kx + \omega t). \quad (۵)$$

که R، شعاع تغییر شکل راسبی، معیاری از مقیاس عرضی میرایی موج در نوار ساحلی است و با رابطه $R=C/f$ تعریف می شود. C سرعت فاز (سرعت گروه در این امواج)، A_0 دامنه امواج، ω فرکانس زاویه ای، f پارامتر کوریولیس و k عدد موج در راستای ساحل است. با توجه



شکل ۸. منحنی تابع چگالی طیفی سرعت در عمق ۵۰ متر برای (الف) مؤلفه u سرعت و (ب) مؤلفه v سرعت



شکل ۷. الف) گل جریان داده های سرعت سنج در نزدیکی سطح، (ب) مقطع عمقی مؤلفه u سرعت در زمان های مختلف. اعداد کنار هر منحنی به ترتیب تاریخ و زمان ثبت داده ها را نشان می دهد.

که u و v مؤلفه های افقی سرعت، η تغییرات سطح، f پارامتر کوریولیس و H_0 عمق متوسط آب است. با فرض:

$$u = u_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

$$\eta = \eta_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

روابط زیر به دست می آید:

$$i\omega u_0 = -igk\eta_0$$

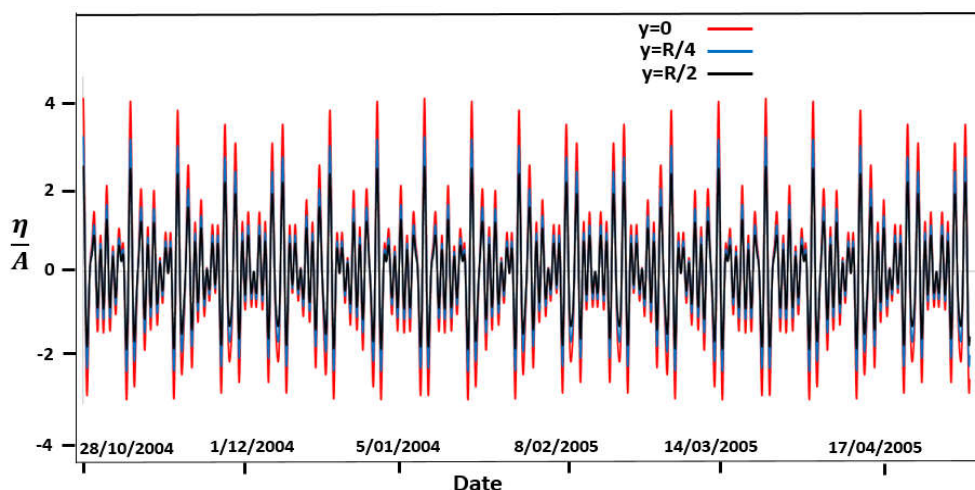
$$fu_0 = -g \frac{d\eta_0}{dy}$$

$$-i\omega\eta_0 + iH_0 k u_0 = 0 \quad (۳)$$

$$\eta_0(\omega^2 - gH_0 k^2) = 0$$

مقاطع و نیز تخمین گرانی کاهش یافته به کمک داده‌ها بود؛ به همین دلیل دو موضوع به‌طور هم‌زمان بررسی شد. با توجه به جدول ۱، وجود مد باروکلینیکی امواج کلونین محتمل‌تر است زیرا طول‌موج مدهای باروتروپیک حدود ۴۰۰ تا ۸۰۰ کیلومتر است که با توجه به موقعیت جغرافیایی خزر (شکل ۱)، حدود چهار تا هشت برابر طول خزر است که به نظر درست نیست، اما مدهای باروکلینیکی بسیار به واقعیت نزدیک هستند و طول‌موج‌های آنها بسیار منطقی به‌نظر می‌رسد (در بخش ۲-۶ بیشتر بحث خواهد شد). با توجه به اینکه در این پژوهش چهار دوره تناوب برای امواج کلونین به‌دست آمد؛ بنابراین چهار سرعت زاویه‌ای نیز محاسبه می‌شود (جدول ۱). با کمک روابط موجود، معادله چهار موج نوشته شد و معادله تداخل این امواج نیز به‌دست آمد. با این فرض که دامنه چهار موج تقریباً برابر و نیز مکان جریان‌سنج در مبدأ مختصات واقع است، نمودارهای η برحسب زمان به فاصله‌های مختلف از ساحل خزر جنوبی رسم شده است (η با A بی‌بعد شده است). شکل ۹، سری زمانی تغییرات تراز سطحی را نشان می‌دهد.

به عمق این سیال، H_0 حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر تخمین زده می‌شود. نکته مهم این است که چنین امواجی معمولاً دو مد باروتروپیک و باروکلینیکی دارند (گیل، ۱۹۸۲). به همین جهت، سرعت گروه، شعاع تغییر شکل راسبی و طول‌موج براساس هر دو مد محاسبه شده است. برای مدهای باروتروپیک، سرعت گروه حدود ۴۰ متر بر ثانیه و شعاع تغییر شکل راسبی حدود ۴۰۰ کیلومتر است. در جدول ۲، طول‌موج برای دوره‌های مختلف محاسبه شده است. مد باروکلینیکی در مناطق دور از سواحل مهم می‌شود (گیل، ۱۹۸۲). پارامترهای فیزیکی مربوط به این مد نیز محاسبه شده است. گرانی کاهش یافته - که در مطالعه دینامیک امواج کلونین مؤثر است - در خزر جنوبی به کمک داده‌های CTD محاسبه و حدود ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۸ متر بر مجذور ثانیه تخمین زده شده است. به این ترتیب، سرعت گروه و شعاع تغییر شکل راسبی به ترتیب حدود ۱/۲ متر بر ثانیه و ۲۰ کیلومتر است. طول‌موج‌های محاسبه شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است. از دلایلی که مؤلفین این پژوهش به مطالعه خواص فیزیکی آب‌های خزر جنوبی پرداختند، مطالعه میزان رفتارهای باروکلینیکی



شکل ۹. منحنی تغییرات تراز سطحی بی‌بعد شده از نوامبر ۲۰۰۴ تا مه ۲۰۰۵ براساس رابطه (۵). منحنی‌ها در فواصل مختلف و براساس نسبت‌هایی از شعاع تغییر شکل راسبی رسم شده‌اند.

۲-۵ تحلیل داده‌های باد

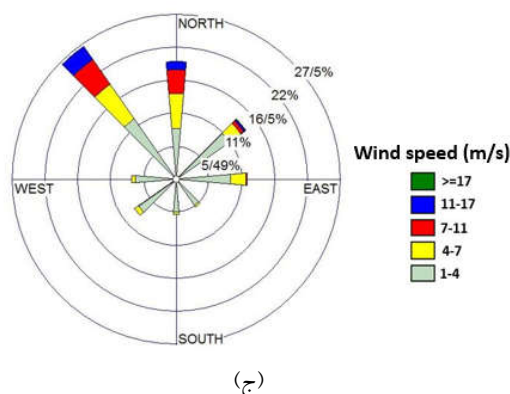
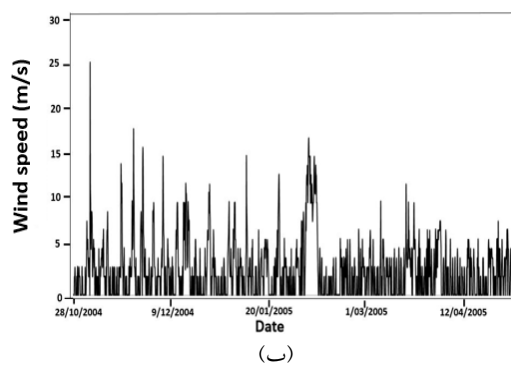
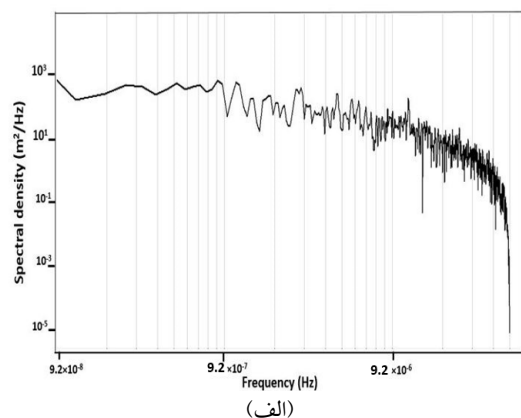
با کمک داده‌های باد، سری زمانی تغییرات باد و گلباد ترسیم شد. برای محاسبه بیشینه‌های غالب، منحنی تابع چگالی طیفی نیز رسم شده است (شکل‌های ۱۰-الف، ب و ج). این شکل‌ها مربوط به بازه زمانی نوامبر ۲۰۰۴ تا مه ۲۰۰۵ هستند که سرعت سنج داده‌ها را ثبت می‌کرد. با توجه به این سری‌ها، بیشترین مقدار مؤلفه‌های سرعت حدود ۲۵ متر بر ثانیه و بیشترین فراوانی سرعت در جهت شمال‌غربی و شمال است؛ یعنی بادهای بیشتر از جهت شمال و شمال‌غرب وارد سواحل ایران می‌شوند. با تحلیل منحنی چگالی طیفی نتیجه می‌شود که بیشینه‌های غالب آن ۳۸، ۱۴، ۱۹، ۸، ۱۱، ۱۲، ۵ و ۳ روز است. این مقادیر با نتایج بخش ۲-۳ همخوانی دارند و با برخی از بیشینه‌های آن هم‌مرتب است. بنابر جدول ۱، مؤلفین بیشینه‌های ۱۹۲ ساعت (۸ روز) و ۲۶۴ ساعت (۱۱ روز) را جزء واداشتهای همدیدی دسته‌بندی کردند. هر دو مؤلفه یاد شده در داده‌های باد وجود دارد، اگرچه بین آنها هم تفاوت‌هایی وجود دارد. دو نکته در اینجا حائز اهمیت است. نکته اول تفاوتی است که بین داده‌ها وجود دارد. داده‌های باد هر سه ساعت و داده‌های سرعت سنج هر بیست دقیقه به ثبت رسیده‌اند. نکته دیگر این است که دوره‌های خیلی بلند در داده‌های باد، احتمالاً ناشی از برخی پدیده‌های دیگر مانند تغییرات فصلی در این ناحیه است.

۲-۶ بررسی تغییرات تراز سطحی

در شکل ۱۱-الف، تغییرات یک‌ساله سطح در نزدیکی بندر انزلی با توجه به داده‌های تراز سطحی ترسیم شده است. در این شکل مشخص است که حدود ۵۰ سانتی‌متر تغییرات تراز سطحی در این ناحیه وجود دارد و در فصل بهار و اوایل تابستان، تراز سطحی به صفر نزدیک‌تر است. در گام بعدی، تابع چگالی طیفی تغییرات تراز سطحی رسم شده است (شکل ۱۱-ب) و با محاسبه بیشینه‌های این

جدول ۲. پارامترهای امواج کلونین با دوره‌های مختلف براساس مدهای باروتروپیک (اندیس T) و باروکلینیک (اندیس C).

T(h)	$k_c \times 10^{-6}$	λ_c (km)	$k_T \times 10^{-6}$	λ_T (km)
۳۰	۱/۵	۴۱۰۴	۴۸	۱۲۹
۴۰	۱/۱	۵۴۷۲	۳۵	۱۷۲
۴۸	۰/۹	۶۵۶۶	۳۰	۲۰۷
۶۰	۰/۷	۸۲۰۸	۲۴	۲۵۹

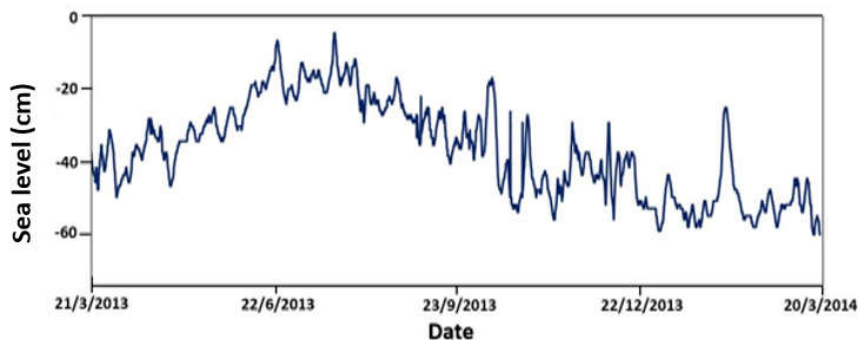


شکل ۱۰. الف) سری زمانی تغییرات مؤلفه‌های سرعت باد در ایستگاه بندر انزلی (شکل ۱-الف)، ب) منحنی چگالی طیفی مؤلفه‌های باد، ج) شکل گلباد.

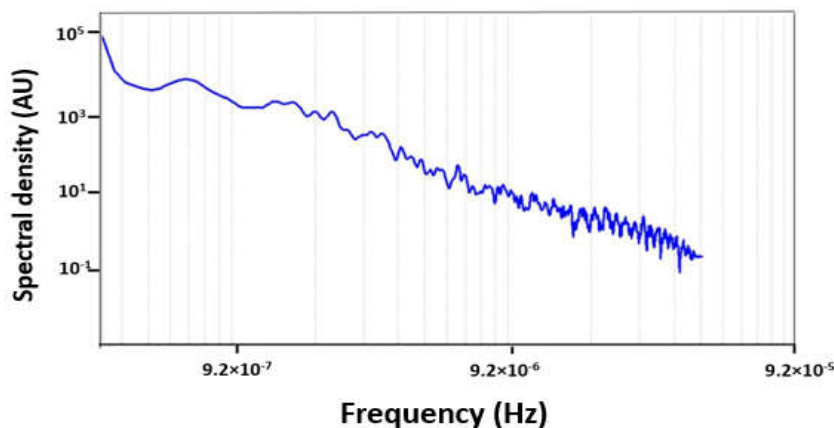
یکبار از خزر میانی وارد شده و پس از حرکت به موازات سواحل ایران با دوره تناوب‌های مشابه با داده‌های میدانی، در سواحل شرقی خزر جنوبی ناپدید می‌شود. این ناهنجاری شیب زیادی در سواحل ایران دارد و هرچه از سواحل دورتر می‌شود، شیب آن نیز کمتر می‌شود. این پدیده با نظریه وجود امواج کلون همخوانی دارد، اگرچه برخی از این پدیده‌ها ممکن است حتی «ادی» باشند و تمایز قائل شدن بین آنها کار دشواری است. نکته مهم دیگر، طول موج این پدیده‌هاست که تخمین‌ها نشان می‌دهد با مدهای باروکلینیکی جدول ۲ تطابق دارد. طول موج ناهنجاری‌ها از ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر متغیر است و نتایج قسمت قبلی را مبنی بر وجود مدهای باروکلینیکی امواج کلون تأیید می‌کند. با توجه به شکل ۱۲،

منحنی، دوره‌های غالب آن ۵۸، ۱۶، ۱۲، ۸ و ۳ روز و ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۷، ۲۴، ۱۱ و ۶ ساعت محاسبه شد. این نتیجه نشان می‌دهد تغییرات تراز سطحی دریا در برخی دوره‌های خیلی بلند، احتمالاً ناشی از تغییرات فصلی و برگشت رواناب‌ها در فصول مختلف سال است. تغییرات با دوره‌های کوچک‌تر، احتمالاً مربوط به پدیده‌هایی است که در بخش ۲-۳ درباره آنها بحث شد؛ چون تا حدود زیادی با نتایج قبلی همخوانی دارد. نکته حائز اهمیت این است که دامنه تغییرات سطحی در دوره تناوب‌های کم، از ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر متغیر است.

در ادامه، تصاویر ماهواره‌ای تغییرات تراز سطح دریا به کمک AVISO بررسی شد (شکل ۱۲). تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد یک ناهنجاری هر چند روز



(الف)



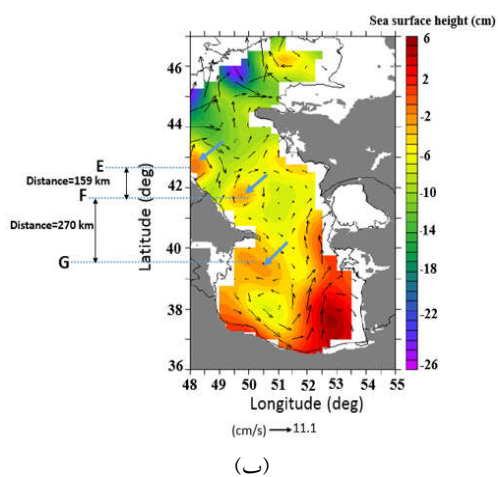
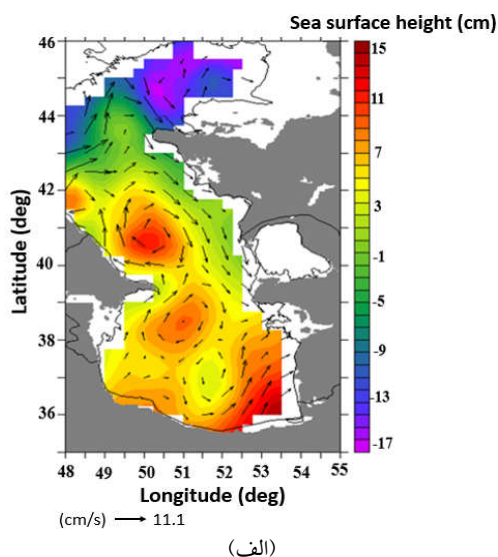
(ب)

شکل ۱۱. (الف) تغییرات تراز سطحی دریا در سال ۱۳۹۲ (۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ میلادی)، (ب) تابع چگالی طیفی داده‌ها در یک واحد اختیاری (Arbitrary Unit).

تراز سطحی مطابقت دارد. به دلیل هم‌زمان نبودن داده‌ها، نمی‌توان جزئیات را با هم مقایسه کرد و از این رو مؤلفین به همین حد بسنده می‌کنند.

۳ نتیجه‌گیری

اگرچه در پژوهش‌های گذشته به نقش توپوگرافی در جریان‌های دریای خزر اشاره شده است، این پژوهش هم بر نقش توپوگرافی و تأثیر شکل سواحل تأکید می‌کند. مطالعه خواص فیزیکی آب‌های خزر جنوبی نشان می‌دهد تغییرات دما عامل مهمی است ولی شوری در شکل‌گیری ساختار آب منطقه، اهمیت کمتری دارد. منحنی T-S در فصول گرم سال به شکلی است که می‌توان هر سه لایه آمیخته، ترموکلاین و عمیق را تشخیص داد ولی در فصول سرد سال نمی‌توان بین آنها تمیز قائل شد. تغییرات دما نشان می‌دهد از اوایل نوامبر تا اوایل فوریه، لایه ترموکلاین به مدت چهار ماه و ترموکلاین فصلی حدود دو ماه (در اواخر زمستان) ناپدید شده و پس از گرم شدن هوا دوباره شکل گرفته‌اند. مقاطع عمقی نشان‌دهنده رفتارهای باروکلینیکی هستند؛ زیرا وجود شیب در پربندهای چگالی مشهود است. براساس تجزیه و تحلیل داده‌های ADCP، به‌طور کلی در خزر جنوبی مقدار مؤلفه u سرعت از مؤلفه v سرعت بیشتر است. منحنی چگالی طیفی نشان می‌دهد دوره‌تناوب‌های چند ساعته تا چند روزه در این حوزه وجود دارد که سبب رخدادهایی همچون امواج کلونین می‌شوند. با توجه به دوره‌تناوب‌های امواج کلونین، در این پژوهش تناوب‌های ۳۰، ۴۰، ۴۸ و ۶۰ ساعته جزء امواج کلونین دسته‌بندی شده‌اند. سرعت گروه برای مدهای باروتروپیک، حدود ۴۰ متر بر ثانیه است در حالی که برای مد باروکلینیکی حدود ۱/۲ متر بر ثانیه تخمین زده شد. نتایج مربوط به طول‌موج‌های این مدها نشان می‌دهد که رفتار آنها بیشتر مشابه



شکل ۱۲. تغییرات شیب سطح دریای خزر با استفاده از تصاویر سنجنده Aviso در فصول تابستان و (الف) و پاییز سال ۲۰۰۴. فلش‌ها، جهت جریان‌های سطحی (زمین‌گردی) را نشان می‌دهند و براساس شیب سطح ترسیم می‌شوند. در شکل (ب) نقاط مشخص شده E، F، G نشان‌دهنده ناهنجاری‌های چسبیده به سواحل خزر میانی (جمهوری آذربایجان) هستند که به سمت خزر جنوبی حرکت می‌کنند. فاصله نقاط مشخص شده از هم، از ۱۵۹ تا ۲۷۰ کیلومتر متغیر است. فاصله این نقاط در واقع همان طول‌موج است. این نقاط برای ماه تابستان (شکل الف) رسم نشده‌اند اما روش تعیین آنها همانند شکل (ب) است.

ناهنجاری‌ها تمایل دارند به سمت راست خود حرکت کنند و از سمت سواحل غربی وارد خزر جنوبی شوند (نقاط E، F، G). دامنه تغییرات سطح، ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود و تا حدود بسیار زیادی با داده‌های

منابع

- چابک‌سوار، ج.، ترابی آزاد، م.، ۱۳۷۶، مطالعه تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی سواحل جنوبی دریای خزر: هشتمین گردهمایی ارگان‌های دریایی کشور و اولین کنفرانس نقش صنایع دریایی در صنعت حمل‌ونقل، ۲۶-۲۷ تیرماه، نکا، ۱۵-۲۳.
- حاجی‌زاده ذاکر، ن.، غفاری نوران، پ.، ۱۳۸۵، ساختار حرارتی فلات قاره ساحل جنوبی دریای خزر در منطقه بابلسر در استان مازندران، ایران: هفتمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، تهران، سازمان بنادر و کشتیرانی، ۲۰۰-۲۰۹.
- علی‌اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۸۳، مبانی دینامیک شاره‌ها: انتشارات دانشگاه تهران، ۱-۲۸۵.
- شکریباغانی، ا.، علی‌اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۸۴، نقش امواج درونی در ایجاد ساختار لایه‌ای در جریان‌های تبدالی شناوری بین دو حوزه دریایی بسته (حوضچه‌های جنوبی و میانی خزر): مجله پژوهش فیزیک ایران، ۵ (۴)، ۲۱۳-۲۲۴.
- Babagoli, J., Bidokhti, A. A., and Shieh, M., 2017, Some aspects of the deep abyssal overflow between the middle and southern basins of the Caspian Sea: *Ocean Science Discussions*, doi: 10.5194/os-2016-87.
- Baidin, S. S., and Kosarev, A. N., 1986, *The Caspian Sea. Hydrology and hydrochemistry*: Nauka, Moscow (in Russian)
- Ferronsky, V. I., Brezgunov, V. S., Vlasova, L. S., Polyakov, V. A., Froehlich, K., and Rozansky, K., 2003, Investigation of water-exchange processes in the Caspian Sea on the basis of isotopic and oceanographic data: *Water Resources*, **30**(1), 10-22.
- Ghaffari, P., Isachsen, P. E., and LaCasce, J. H., 2013, Topographic effects on current variability in the Caspian Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**(12), 7107-7116.
- Gill, A. E., 1982, *Atmosphere-Ocean Dynamics*: Academic Press, New York.
- Gunduz, M., 2014, Caspian Sea surface circulation variability inferred from satellite

رفتارهای باروکلینیک است. برای چنین مدی، شعاع تغییر شکل راسبی حدود ۲۰ کیلومتر تخمین زده شده است. به کمک داده‌های CTD، گرانی کاهش یافته در این ناحیه حدود ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۸ متر بر مجذور ثانیه به دست آمده و منحنی تغییرات تراز سطحی رسم شده است. مطالعه تراز سطحی بویه بندر انزلی، حاکی از وجود تغییرات در این حوزه است که با فرکانس‌های وقوع دستگاه سرعت‌سنج همخوانی خوبی دارند. از طرف دیگر، تحلیل داده‌های ماهواره‌ای هم وجود ناهنجاری‌هایی را در سواحل ایران تأیید می‌کند که احتمالاً ناشی از امواج کلون است. تجزیه و تحلیل داده‌های باد نشان می‌دهد جهت باد در این ناحیه بیشتر شمال و شمال‌غربی است و دوره‌های چند ساعته تا چند روزه دارد. احتمالاً برخی از همین مؤلفه‌ها در شکل‌گیری جریانات، نقش مهمی ایفا می‌کنند. با توجه به این پژوهش و بررسی‌های گذشته، به علت فقدان داده‌های اندازه‌گیری مناسب، هنوز نمی‌توان درباره وجود برخی از پدیده‌ها با قاطعیت اظهار نظر کرد؛ در نتیجه پیشنهاد می‌شود اندازه‌گیری داده‌ها دور از سواحل ایران و در آب‌های عمیق انجام شود تا بتوان به بسیاری از این پرسش‌ها پاسخ داد و با قطعیت درباره این حوزه سخن گفت. اندازه‌گیری در سواحل دور و آب‌های عمیق، به اقیانوس‌شناسان امکان بررسی بهتر پدیده‌های فیزیکی را می‌دهد. علاوه بر این، بهتر است از داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک بیشتر و فواصل زمانی چند ساعته استفاده شود تا ناهنجاری‌های سطح بهتر رصد شود.

سپاسگزاری

از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، سازمان هواشناسی کشور و سازمان بنادر و دریانوردی سپاسگزاریم که داده‌های این پژوهش را در اختیار ما قرار دادند.

- Rodionov, S., 2012, Global and regional climate interaction: The Caspian Sea experience: **11**, Springer Science and Business Media.
- Temimi, M., Romanov, P., Ghedira, H., Khanbilvardi, R., and Smith, K., 2011, Sea-ice monitoring over the Caspian Sea using geostationary satellite data: *International Journal of Remote Sensing*, **32**(6), 1575-1593.
- Terziev, F. S., Kosarev, A., and Kerimov, A. A., 1992, The Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas, **6**, The Caspian Sea, Issue 1, Hydrometeorological Conditions, Hydrometeoizdat, St. Petersburg, Russia.
- Tuzhilkin, V. S., and Kosarev, A. N., 2005, Thermohaline structure and general circulation of the Caspian Sea waters, in: *Caspian Sea Environment*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Handbook of Environmental Chemistry.
- Vallis, G. K., 2006, Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Cambridge University Press.
- altimeter and sea surface temperature: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**(2), 1420-1430.
- Gunduz, M., Özsoy, E., 2014, Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea: *Ocean Science*, **11**, 259-292.
- Kara, A. B., Wallcraft, A. J., Metzger, E. J., and Gunduz, M., 2010, Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea: *Continental Shelf Research*, **30**(10), 1211-1225.
- Kosarev, A. N., 2005, Physico-geographical conditions of the Caspian Sea, in *The Caspian Sea Environment*, Springer, Berlin, Heidelberg, 5-31.
- Litovchenko, K., and Ivanov, A., 2008, Monitoring of oil spills in the north Caspian sea using SAR imagery and multi-sensor satellite data, in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, IGARSS 2008, **4**, IV-605.

Investigation of physical properties and long coastal waves in the southern Caspian Sea

Javad Babagoli^{1*}, Abbas_Ali Aliakbari Bidokhti², and Zahra Salmani Ghazvini³

¹M. Sc., Physical Oceanography, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Professor, Physical Oceanography, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³M. Sc., Physical Oceanography, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 12 March 2018, Accepted: 17 June 2018)

Summary

The Caspian Sea, the world's largest inland enclosed water body, consists of three basins namely northern, middle and southern. This study investigates physical oceanography properties and long waves in the southern Caspian Sea. To deal with this, we used ADCP, CTD, weather data, sea level and satellite imageries. The data were collected by National Institute of Oceanography and Atmospheric Sciences (ADCP and CTD), Port and Maritime Organization (sea level), and Meteorological Organization (wind data). The results show that the temperature plays pivotal role in the structure of water in this basin. The place of thermocline and pycnocline are about at the same depth and the thickness of mixed layer in the summer and fall are about 25 and 15 meters, respectively. The analyses of ADCP data show that thermocline disappears from February to March and after two months, the thermocline starts to develop. In most of cases, the magnitude of meridional velocity is stronger than zonal speed based on ADCP data. Spectral density of time variations of velocities of current and wind show that there are many peaks from a few hours to many days. We consider some periods such as 30, 40, 48 and 60 hours as Kelvin waves based on our background information about these waves. Sea level data and satellite images (Aviso sensor) confirm the results in terms of periods and wavelengths. Due to barotropic and baroclinic modes of Kelvin waves, wavelengths, angular frequencies and group speeds are calculated separately. According to these results, baroclinic mode is more important than barotropic mode in this basin. Based on the governing equations of shallow water, the sea level gradient equation was written and time series of sea surface level changes were plotted. The results show that the long wave amplitudes are from 10 to 15 cm according to satellite and observation data. In this basin, the reduced gravity varies from 0.006 to 0.008 m/s² in different seasons and the thickness of the denser water column is considered about 150-200 m. The Rossby radius of deformation and group velocity are 20 km and 1.2 m/s, respectively. Due to different periods of Kelvin waves, the wavelengths vary from 129 to 259 km. The satellite images confirm Kelvin waves because there are some anomalies in sea level similar to that produced by Kelvin waves with similar periods and wavelengths. Based on results, it is recommended that more detailed observational data should be collected in the deep parts of the southern and middle basins of the Caspian Sea.

Keywords: Southern Caspian Sea, observation data, variability of oceanography properties, feasibility of Kelvin wave occurrence, validation

*Corresponding author: