

(مقاله پژوهشی)

تغییرات سرعت صوت آب در جنوب شرق دریای خزر بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی

سمیه نهاوندیان^۱، ایمان مهرایی دستنایی^۲s.nahavandian@modares.ac.ir

۱- استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، نور

۲- استادیار دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

چکیده

در این مطالعه تغییرات فصلی سرعت صوت در ستون آب و به تبع آن دما، شوری در منطقه بابلسر، بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده بررسی شد. داده‌های استفاده شده حاصل اندازه‌گیری‌های انجام شده در دو فصل گرم (تابستان) و سرد (زمستان) سال ۱۳۹۷ و از نزدیک ساحل به دور از ساحل است. لایه آمیخته با استفاده از الگوریتم ترکیبی فصلی آستانه، با مقادیر ۱/۲۵ (°C) در فصل تابستان و ۰/۱ (°C) در فصل زمستان، محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در فصل تابستان به دلیل گرم بودن هوا و افزایش لایه‌بندی، عمق لایه آمیخته کمتر از زمستان است. در فصل زمستان به دلیل سرد شدن هوا و افزایش سرعت باد و افزایش همرفت عمود از سطح تا عمق را کانال صوتی سطحی احاطه کرده است و در فصل تابستان کانال صوتی وجود ندارد. دما در فصل تابستان در سطح به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از فصل زمستان است. همچنین شیب ترموکلاین در تابستان بسیار شدید و در زمستان به شدت ضعیف است.

واژگان کلیدی: صوت، دما، شوری، عمق لایه آمیخته، دریای خزر، بابلسر



تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

DOI: ۱۰.۲۲۰۳۴/IJMT.۲۰۲۲.۵۴۳۸۴۵.۱۷۷۸

صص ۹۱-۱۰۰

۱- مقدمه

صوت وسیله‌ای مناسب برای انتقال اطلاعات در فواصل دور در دریا است و تنها ابزاری است که می‌تواند برای سنجش از دور اقیانوس در عمق چند ده متری استفاده شود. از طرفی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های کف دریا، عمق اقیانوس، دما و جریان در اقیانوس از صوت استفاده می‌شود. حیوانات دریایی از کوچک‌ترین لاروها تا بزرگ‌ترین نهنگ‌ها برای حرکت، برقراری ارتباط و یافتن غذا، مکانیزم‌هایی برای تولید و دریافت سیگنال‌های صوتی دارند [۱]. متوسط عمق اقیانوس‌ها ۴۰۰۰ متر است و نور فقط در حدود ۱۰۰ متر از سطح نفوذ می‌کند، اما حیات در اعماق پایین این منطقه نورانی به وفور یافت می‌شود. موجودات دریایی در اعماق غیرنورانی خانه‌های خود را بنا می‌کنند، غذا پیدا می‌کند، زندگی اجتماعی دارند، جفت‌گیری می‌کند، هم‌زمان از شکارچیان دوری می‌کنند و همه این‌ها بدون حضور نور انجام می‌شود. آب اقیانوس تقریباً ۱۰۰۰ برابر چگال‌تر از هوا است و در نتیجه سرعت صوت در اقیانوس تقریباً پنج برابر بیشتر از هوا و با تضعیف بسیار کمتر است، به طوری که صوت بیشتر و سریعتر درون آب حرکت می‌کند. موجودات دریایی برای استفاده از صوت، به عنوان یک روش حسی اولیه برای تعامل با محیط خود تکامل یافته‌اند. نمونه‌های جالب در این خصوص، لارو سخت‌پوستان که به صدای نوع صخره مناسب گوش می‌دهند، میگوهای که حباب‌هایی تولید می‌کنند که صدای آن طعمه را بی‌حس می‌کند. ماهی‌هایی که در فصل جفت‌گیری بر روی ماهی‌های شنای خود می‌کوبند، دلفین‌های رودخانه‌ای کور که با استفاده از صداهای کلیک حرکت می‌کنند و ارتباط برقرار می‌کنند و همچنین ناله‌های طولانی نهنگ‌های آبی که می‌توانند ۱۰۰۰ کیلومتر را طی کنند. از طرف دیگر، نوآوری در فناوری ثبت داده‌های زیر آب اکنون امکان نظارت از راه دور حیوانات و محیط زیست را بدون نیاز به اتکا به ناظران انسانی، حضور فیزیکی کشتی و نمونه‌گیری فراهم می‌کند. پایش غیرفعال، یک روش کارآمد، غیرتهاجمی، جایگزین نسبتاً کم هزینه برای اکتشافات عملی است که اطلاعات باارزشی در مورد منابع صوتی منطقه‌ای (بیولوژیکی، انسانی، ژئوفیزیکی)، رفتار حیوانات، پویایی اکوسیستم، تنوع زیستی، و اثرات فعالیت‌های

انسانی ارائه می‌کند [۲]. از طرفی به دلیل موارد استفاده گسترده از انتشار صوت در امور نظامی، این مقوله پس از جنگ جهانی دوم به طور گسترده‌تر مورد توجه قرار گرفت [۳].

یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در انتشار صوت، فرآیندهای بیوشیمیایی دریا و پخش آلودگی، ساختار قائم آب است و از طرفی ساختار قائم کاملاً تحت تاثیر اقلیم منطقه و تغییرات اقلیمی است [۴]. ساختار قائم آب از سطح تا عمق شامل سه لایه اصلی، آمیخته، دماشیب^۱ در پروفایل دما (هالوکلاین در پروفایل شوری) و لایه عمیق (لایه منتهی به بستر) می‌باشد. خصوصیات فیزیکی درون لایه آمیخته اعم از دما و شوری، به علت تلاطم ناشی از تماس مستقیم با جو تقریباً ثابت است. لایه آمیخته از این جانب که محل تبادلات انرژی میان جو و اقیانوس است و همچنین نقش تاثیرگذاری در فرآیندهای بیوشیمیایی دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است [۵]. کانال صوتی سطحی معادل آکوستیکی لایه آمیخته می‌باشد و در بسیاری از مطالعات از جمله مطالعه حاضر، عمق لایه آمیخته (MLD^۲) و عمق لایه صوتی (SLD^۳) به جای یکدیگر استفاده می‌شوند. عمق کانال صوتی عموماً برحسب گرادیان سرعت صوت تخمین زده می‌شود، همان‌طور که MLD نیز برحسب تغییرات گرادیان دما، شوری، چگالی و پارامترهای دیگر شناخته می‌شود [۶].

MLD از مهم‌ترین عوامل فیزیکی است که تحت تاثیر عوامل جوی به صورت روزانه، فصلی و سالانه تغییر می‌کند [۷]. افزایش تابش اشعه خورشید باعث افزایش لایه‌بندی می‌شود و کاهش MLD و به تبع SLD را به دنبال دارد و کاهش دمای هوا و افزایش تبخیر نیز باعث افزایش آشفستگی لایه سطحی و افزایش مقدار MLD و به تبع SLD می‌گردد [۷ و ۸]. خصوصیات فیزیکی در عمیق‌ترین لایه اقیانوسی که در زیر لایه شیب (ترموکلاین، هالوکلاین و پیکنوکلاین) قرار دارد، تقریباً ثابت و این لایه با نام لایه عمیق شناخته شده است. به علت نقش مهم MLD در تعیین ظرفیت گرمایی اقیانوسی، MLD تاثیر به‌سزایی بر تبادلات هوا-دریا و همچنین ENSO (El Oscillation) Niño/Southern دارد [۸ و ۹].

۱. Thermocline

۲. Sonic Layer Depth

۳. Sonic Layer Depth

منطقه بابلسر و رامسر با استفاده از داده‌های CTD، با استفاده از روش آستانه بر پایه پروفایل دما محاسبه شده است. الگوریتم نهایی پیشنهاد شده در این مطالعه شامل مقدار آستانه ۰/۵ (°C) برای داده‌های پاییزی، آستانه ۱/۲۵ (°C) برای داده‌های بهاری و آستانه ۱ (°C) برای داده‌های تابستانی است. نتایج تحقیق نشان داد MLD در فصل پاییز با عمقی بین ۴۰-۴۵ متر، بیشترین و در فصل بهار با عمقی در حدود ۵-۱۰ متر، کمترین عمق در میان فصول مختلف را داراست [۱۸].

مطالعات کاربردی آکوستیک و خصوصیات هیدروآکوستیکی به طور گسترده از جنگ دوم جهانی آغاز گردید [۳]. اموج صوتی در حال حرکت در اقیانوس، هرگاه با تغییراتی در سرعت صوت مواجه شوند، شکسته می‌شوند. طبق تحقیقات انجام شده در دریای خزر و در مجاورت دهانه رودخانه سفیدرود، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۰۸، سرعت صوت در حدود ۱۴۵۳-۱۵۱۹ (متر بر ثانیه) در سطح و در حدود ۱۴۵۰-۴۷۰ (m) (متر بر ثانیه) در عمق حدود ۱۹ تغییرات فصلی در سرعت صوت در عمق مشاهده نشد. در فصل زمستان سرعت صوت در سطح حدود ۱۴۵۷-۱۴۵۹ (متر بر ثانیه) و در عمق حدود ۱۴۵۰ (متر بر ثانیه) بود [۱۹]. همچنین در مطالعه دیگری در سه منطقه انزلی، نوشهر و بابلسر در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۵ تغییرات دما و شوری در ستون آب با استفاده از داده‌های میدانی، بررسی گردید. با این وجود در این مطالعه به داده‌های ماه اکتبر در منطقه بابلسر بسنده شده و امکان مقایسه الگوهای تابستانه و زمستانه فراهم نشده است [۲۰].

در این تحقیق تغییرات فصلی خصوصیات فیزیکی در ستون آب اعم از دما و شوری، MLD و همچنین سرعت صوت در منطقه بابلسر در دو الگوی تابستانه و زمستانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری میدانی

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی نظیر شوری و دما در تمام لایه‌ها و همچنین تخمین MLD به اندازه‌گیری‌های پیوسته در ستون آب از سطح تا عمق نیازمندیم. به همین منظور اندازه‌گیری‌های استفاده شده در تحقیق حاضر با

دریای خزر با مساحت حدود ۴۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع، خط ساحلی حدود ۷۵۰۰ کیلومتر، میانگین عمق حدود ۲۱۰ متر و حداکثر عمق حدود ۱۰۲۵ متر، بزرگ‌ترین دریاچه جهان به شمار می‌رود. شرایط آب و هوایی متنوعی بر دریای خزر حاکم است که علت آن را می‌توان کشیدگی زیاد آن در راستای عرض جغرافیایی دانست. تنوع آب و هوایی دریای خزر به این شکل نمایان می‌شود که شاهد یخ زدن بخش شمالی این دریاچه در طول زمستان هستیم، در حالی که در نیمه جنوبی آن شرایط آب و هوایی نیمه گرمسیری حاکم است. دریای خزر از لحاظ اقتصادی و سیاسی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و همچنین اکوسیستم ویژه و مختص به خود دارد که بیش از پیش بر این اهمیت می‌افزاید. آلودگی‌های زیادی که در سال‌های اخیر به این دریاچه سرازیر شده است، اکوسیستم این دریاچه را دچار اختلال و تهدید کرده است و حتی خصوصیات فیزیکی آن را نیز دچار تغییر ساخته است [۱۰-۱۳]. شرایط فیزیکی، راهبردی و اکوسیستم منحصر به فرد دریای خزر، لزوم بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن را بیش از پیش آشکار می‌سازد [۱۵] و [۱۴].

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز در نزدیکی بندر انزلی MLD در فصل بهار حدود ۸ متر، در فصل تابستان حدود ۲۰ متر و در فصل بهار حدود ۲۵ متر گزارش شده است [۱۶]. لازم به ذکر است MLD در این تحقیق به صورت چشمی برآورد شده و در تمامی ایستگاه‌ها نیز عمق یکسان لحاظ شده است که نشان از تخمین حدودی SLD می‌باشد. تغییرات فصلی ساختار قائم خصوصیات فیزیکی آب در منطقه آلاشت‌رود و لاویج‌رود، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد با اینکه به طور کلی دما نقش کلیدی و غالب در تعیین چگالی بازی می‌کند، در فصل پاییز و تابستان شوری نقش بیشتری نسبت به دیگر فصول در تعیین چگالی بازی می‌کند. در فصل پاییز SLD عمیق‌ترین و در فصل بهار کم عمق‌ترین است و لایه آمیخته در فصل پاییز دارای کم‌ترین دما و در فصل تابستان دارای بیشترین دما می‌باشد [۱۷]. پیش از این، MLD در سه فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۳۹۱ در

جدول (۱) موقعیت جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) ایستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری در منطقه بابلسر

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	۰۳۶ ۴۳' ۱۸/۴۲۶"	۳۹°۵۲' ۳۳/۶۸"
۲	۰۳۶ ۴۳' ۵۸/۷۲۱"	۳۹°۵۲' ۳۶/۳۶"
۳	۰۳۶ ۴۵' ۵۵/۷۱۷"	۳۹°۵۲' ۲۸/۲۳۱"
۴	۰۳۶ ۴۸' ۴۱/۳۵۷"	۳۹°۵۲' ۲۹/۱۳۸"
۵	۰۳۶ ۴۹' ۰۹/۷"	۳۹°۵۲' ۴۰/۶"
۶	۰۳۶ ۴۹' ۵۱/۱"	۳۹°۵۲' ۲۱/۷"

۳- تئوری و محاسبات

۳-۱- تصحیحات شوری

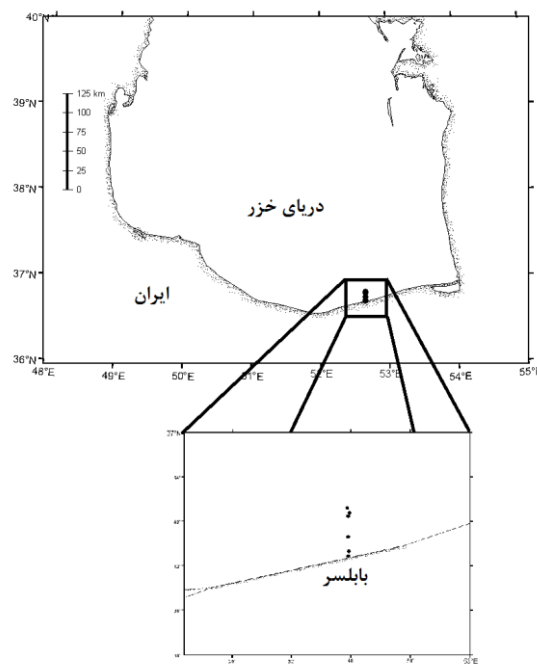
همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، پس از سال ۱۹۷۸ شوری برحسب PSU با در دست داشتن رسانایی محاسبه می‌شود. در تنظیمات CTD از معادلات ارائه شده یونسکو (۱۹۸۱) استفاده می‌شود [۱]. لازم به ذکر است که ضریب تبدیل تعریف شده در دستگاه CTD طبق بررسی یون‌های موجود در اقیانوس‌ها و روابط تجربی ارائه گردیده است. از آنجاییکه که ترکیب یونی آب دریای خزر با آب‌های دیگر اقیانوس‌ها متفاوت است، نیاز به در دست داشتن ضریب تبدیل رسانایی تعریف شده در دستگاه CTD است تا برای به دست آوردن شوری مناسب دریای خزر مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین در اینجا شوری دریای خزر $(Sal_{Caspian})$ از رابطه $Sal_{Caspian} = 1.017 \times Sal_{CTD}$ محاسبه شده است که Sal_{CTD} شوری به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه و ۱/۰۱۷ ضریب تصحیح شوری پیشنهاد شده در سال ۲۰۰۰ توسط Peeters و همکاران برای دریای خزر می‌باشد [۲۱ و ۲۲].

استفاده از دستگاه CTD در دو فصل تابستان و زمستان سال ۱۳۹۷ و در ۷ الی ۸ ایستگاه در منطقه بابلسر از نزدیک ساحل به دور از ساحل انجام شد. اندازه‌گیری داده‌های دما، شوری و کلروفیل-آ با استفاده از دستگاه CTD ساخت Sea & Sun، مدل M۱۱۵ انجام شده است. منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ و موقعیت جغرافیایی اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها در فصل‌های تابستان و زمستان به ترتیب در ۴ مردادماه و ۱ بهمن‌ماه سال ۱۳۹۷ انجام شد. برای انجام اندازه‌گیری‌ها، ابتدا حسگر فشار در آزمایشگاه کالیبره شد، بدین صورت که با اتصال به نرم‌افزار فشار جو حذف گردید. برای کالیبراسیون حسگر دما، دستگاه در عمق ۱ متر برای مدتی نگه داشته و پس از آن دستگاه به آرامی با سرعت ۱ (متر بر ثانیه) به داخل ستون آب تا عمق مورد نظر فرستاده شد. بدین منظور انتقال دستگاه از سطح به عمق با سرعت آرام و یکنواخت (نزدیک به ۱ متر بر ثانیه) توسط اپراتور دستگاه انجام و دستگاه به عمق مورد نظر فرستاده شد، به طوری که در هر متر چند اندازه‌گیری ثبت گردید. در پایان داده‌های ذخیره شده در دستگاه به کامپیوتر انتقال داده شد. به منظور پردازش داده‌ها، ابتدا داده‌های تکراری در هر عمق حذف شدند و میانگین داده‌های تکراری در عمق مورد نظر ثبت گردید. سپس با استفاده از روش‌های خطی، کیوبیک و اسپلاین داده‌ها در فواصل ۰/۵ و ۱ متر درونیابی شدند. در ادامه داده‌های حاصل شده از روش‌های مختلف درونیابی در فواصل ۰/۵ و ۱ متر با یکدیگر مقایسه شدند. از آنجا که تفاوت قابل توجهی میان روش‌های مختلف درونیابی و در فواصل ۰/۵ و ۱ متر مشاهده نشد، داده‌های حاصل شده از درونیابی خطی و در فواصل ۱ متر، به عنوان داده‌های پردازش شده نهایی جهت ادامه تحقیقات ثبت گردیدند.

اساس روش آستانه، MLD عمقی است که در آن اختلاف پارامتر مورد نظر در اینجا دما و سرعت صوت در آن عمق از مقدار آن در سطح از مقدار از پیش تعیین شده (آستانه) فراتر رود [۲۶ و ۲۷]. مقدار آستانه بسته به پارامتر و منطقه مورد نظر در مطالعات مختلف، متفاوت است که چند نمونه از آنها در جدول ۲ نشان داده شده است [۳۱-۲۷]. نمونه‌ای از تخمین MLD از طریق روش آستانه با مقدار آستانه $1/25$ ($^{\circ}\text{C}$) در شکل ۲ نشان داده شده است. پیش‌تر برای محاسبه MLD در منطقه بابلسر و رامسر، از الگوریتم ترکیبی فصلی آستانه‌های $1/25$ ($^{\circ}\text{C}$) در فصل بهار، آستانه ۱ ($^{\circ}\text{C}$) در فصل تابستان و آستانه $0/5$ ($^{\circ}\text{C}$) در فصل پاییز استفاده شد [۱۶]. در مطالعه حاضر با در اختیار داشتن داده‌های اندازه‌گیری در دو فصل سال ۱۳۹۷، MLD بر پایه پروفایل دما با استفاده از روش آستانه محاسبه گردید. عمق لایه صوتی (SLD) حد پایینی کانال صوتی سطحی است که با استفاده از پروفایل سرعت صوت تخمین زده شده و عمق بیشینه سرعت صوت بهترین شاخص جهت تعیین مقدار آن می‌باشد.

۴- نتایج

تغییرات فصلی دما، شوری و سرعت صوت در منطقه بابلسر در شکل ۳ و جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت دما در فصل تابستان در سطح آب به مراتب بیشتر از فصل زمستان بوده و دمای لایه عمیق در هر دو فصل یکسان است. به دلیل اختلاط بالای سطح در فصل زمستان به دنبال کاهش شدید دما در این فصل، دما در سطح کمترین مقدار را دارد و اختلاف دمای سطح و عمق بسیار کم و ترموکلاین بسیار ضعیف است. گستره تغییرات دما در فصل تابستان زیاد است. همانطور که پیش‌تر اشاره و در شکل ۴ نیز نشان داده شده است، آستانه استفاده شده برای تخمین MLD در فصل تابستان $1/25$ ($^{\circ}\text{C}$) می‌باشد.



شکل (۱) منطقه مورد مطالعه واقع در جنوب دریای خزر، بخش فلات قاره بابلسر. دایره‌های نشان داده شده در شکل، ایستگاه‌های اندازه‌گیری این مطالعه می‌باشند.

۲-۳ محاسبه سرعت صوت

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، سرعت صوت در دریا با دما، شوری و فشار تغییر می‌کند که با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است [۲۴ و ۲۳].

$$C = 1448.96 + 4.591 T - 0.05304 T^2 + 0.0002374 T^3 + 0.0160 Z + (1.340 - 0.01025 T)(S - 35) + 1.675 \times 10^{-7} Z^2 - 7.139 \times 10^{-12} TZ^2$$

که در آن C سرعت صوت (متر بر ثانیه)، T دما ($^{\circ}\text{C}$)، S شوری و Z عمق (m) است.

۴-۳ محاسبه عمق لایه صوتی و لایه آمیخته

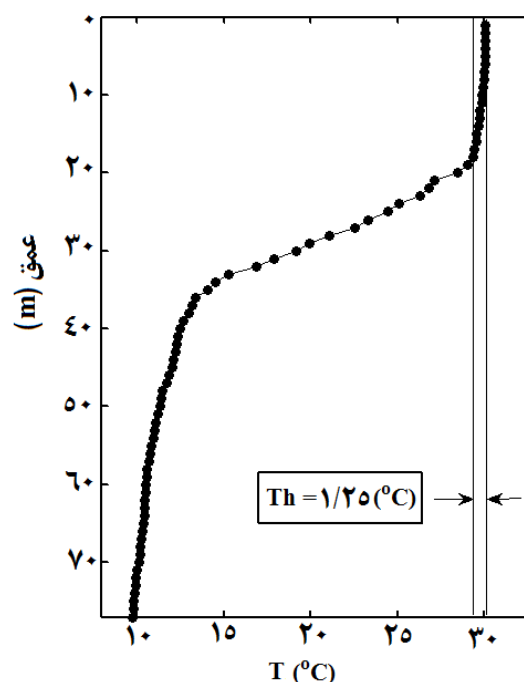
برای محاسبه MLD روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته اند که در مطالعه‌ای که توسط Thomson و Fine (۲۰۰۳) انجام شده، به پاره‌ای از آنها اشاره شده است [۲۵]. روش آستانه (Threshold method) بر پایه پارامترهای مختلف از جمله دما، شوری، چگالی، اکسیژن و غیره از معمول‌ترین روش‌های تخمین MLD است. بر

جدول (۲) لیستی از مطالعات مرتبط با تخمین MLD با استفاده از روش آستانه بر پایه دما (T) و دمای پتانسیل (θ)

منبع مطالعه	پارامتر پایه محاسبه لایه آمیخته	مقدار آستانه و عمق مرجع
Thompson (۱۹۷۶) [۲۱]	دما	$\Delta T = 0.2 \text{ }^\circ\text{C}; z = 0 \text{ m}$
Lamb (۱۹۸۴) [۲۴]	دما	$\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}; z = 0 \text{ m}$
Plueddemann و Weller	دما	$\Delta T = 0.001 \text{ }^\circ\text{C}; z = 2/25 \text{ m}$
Wagner (۱۹۹۶) [۲۶]	دما	$\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}; z = 2/25 \text{ m}$
Kara و همکاران (۲۰۰۰) [۲۷]	دما	بهار: $\Delta T = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}; z = 0 \text{ m}$
	دما	تابستان: $\Delta T = 0.2 \text{ }^\circ\text{C}; z = 0 \text{ m}$
	دما	پاییز: $\Delta T = 0.8 \text{ }^\circ\text{C}; z = 0 \text{ m}$
	دما	زمستان: $\Delta T = 0.8 \text{ }^\circ\text{C}; z = 0 \text{ m}$
Qu و همکاران (۲۰۰۷) [۲۸]	دمای پتانسیل	$\Delta \theta = 0.8 \text{ }^\circ\text{C}; z = 10 \text{ m}$

مقایسه و در لایه عمیق در هر دو فصل تقریباً ثابت است. گستره تغییرات صوت در تابستان بیش تر از زمستان است و میانگین آن در لایه آمیخته بیشترین و در نزدیک بستر کمترین مقدار را دارد.

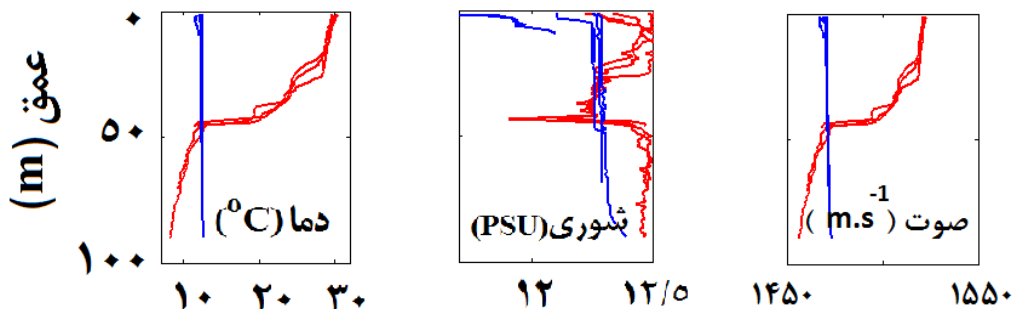
همانطور که در شکل ۴ قابل رویت است، مناسبترین تخمین MLD در فصل تابستان با مقدار آستانه ۱ و ۱/۲۵ $^\circ\text{C}$ و در فصل زمستان آستانه ۰/۱ $^\circ\text{C}$ می باشد. با استناد به مطالعه انجام شده در مناطق رامسر و بابلسر در مطالعه انجام شده توسط جاننار فریدونی و همکاران (۱۳۹۹)، برای تخمین MLD در مطالعه حاضر برای فصل های تابستان و پاییز به ترتیب از مقادیر آستانه ۱ و ۰/۵ $^\circ\text{C}$ استفاده شد. شکل ۵ نشان دهنده تغییرات زمانی (فصلی) و مکانی (از نزدیکی ساحل به دور از ساحل) دما، شوری و سرعت صوت در منطقه مورد مطالعه است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، در فصل تابستان دما در سطح بسیار بالاتر از فصل زمستان است. همانطور که در شکل نیز مشهود است، دمای لایه عمیق در تمامی فصول یکسان و کمتر از ۱۰ $^\circ\text{C}$ است. SLD که با خط سیاه پر رنگ نشان داده شده است، تایید کننده این واقعیت است که MLD در تابستان کمتر از زمستان است و ترموکلاین که با تغییر رنگ در شکل نشان داده شده است، درست در زیر لایه آمیخته قرار دارد.



شکل (۲) تخمین MLD با استفاده از روش آستانه. در اینجا MLD با مقدار آستانه $1/25 \text{ }^\circ\text{C}$ به درستی تخمین زده شده است.

میانگین دمای لایه آمیخته در فصل تابستان در مقایسه با دیگر فصول بیشترین $29/8-30/4 \text{ }^\circ\text{C}$ ، در ترموکلاین در حدود $18/2-21/8 \text{ }^\circ\text{C}$ و در لایه عمیق نیز در حدود $13/9-22/9 \text{ }^\circ\text{C}$ می باشد. شوری در تابستان و زمستان مشابه و در حدود $12-12/44 \text{ (PSU)}$ است. میانگین شوری در دو لایه ترموکلاین و عمیق در این دو فصل قابل

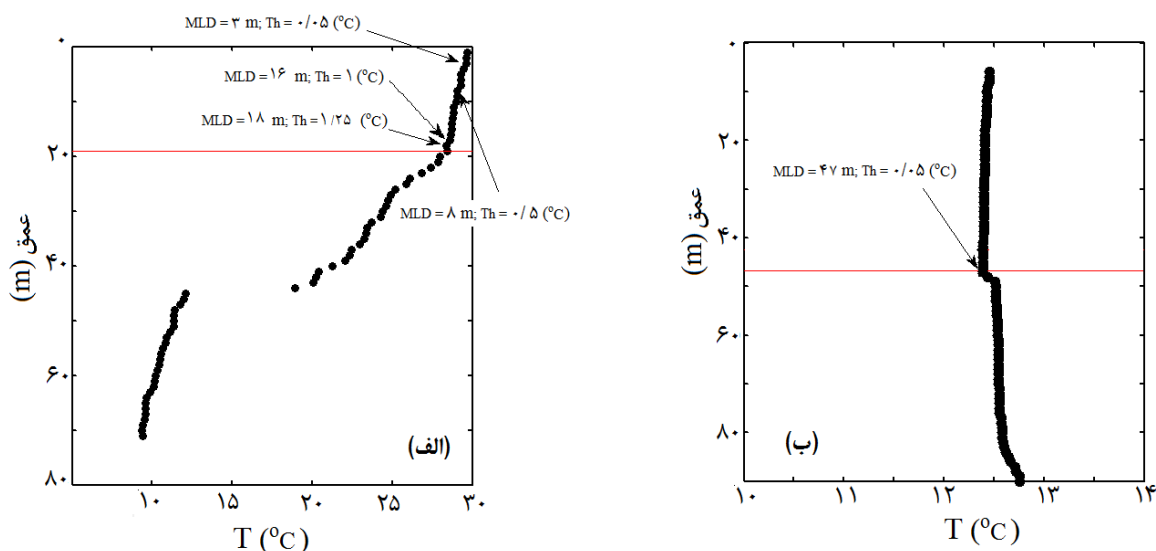
زمستان — تابستان —



شکل (۳) تغییرات دما (T (°C)، شوری (PSU) و سرعت صوت (متر بر ثانیه) در منطقه بابلسر در فصل‌های تابستان (خطوط قرمز رنگ) و زمستان (خطوط آبی رنگ)

جدول (۳) دامنه تغییرات کمیت‌های مختلف اعم از دما (°C)، شوری (PSU)، سرعت صوت (متر بر ثانیه)، MLD (m)، میانگین دما (°C)، شوری (PSU) و سرعت صوت (متر بر ثانیه) در لایه آمیخته، میانگین دما (°C)، شوری (PSU) و سرعت صوت (متر بر ثانیه) در ترموکلاین و میانگین دما (°C)، شوری (PSU) و سرعت صوت (متر بر ثانیه) در لایه عمیق در فصل‌های تابستان و زمستان در منطقه بابلسر

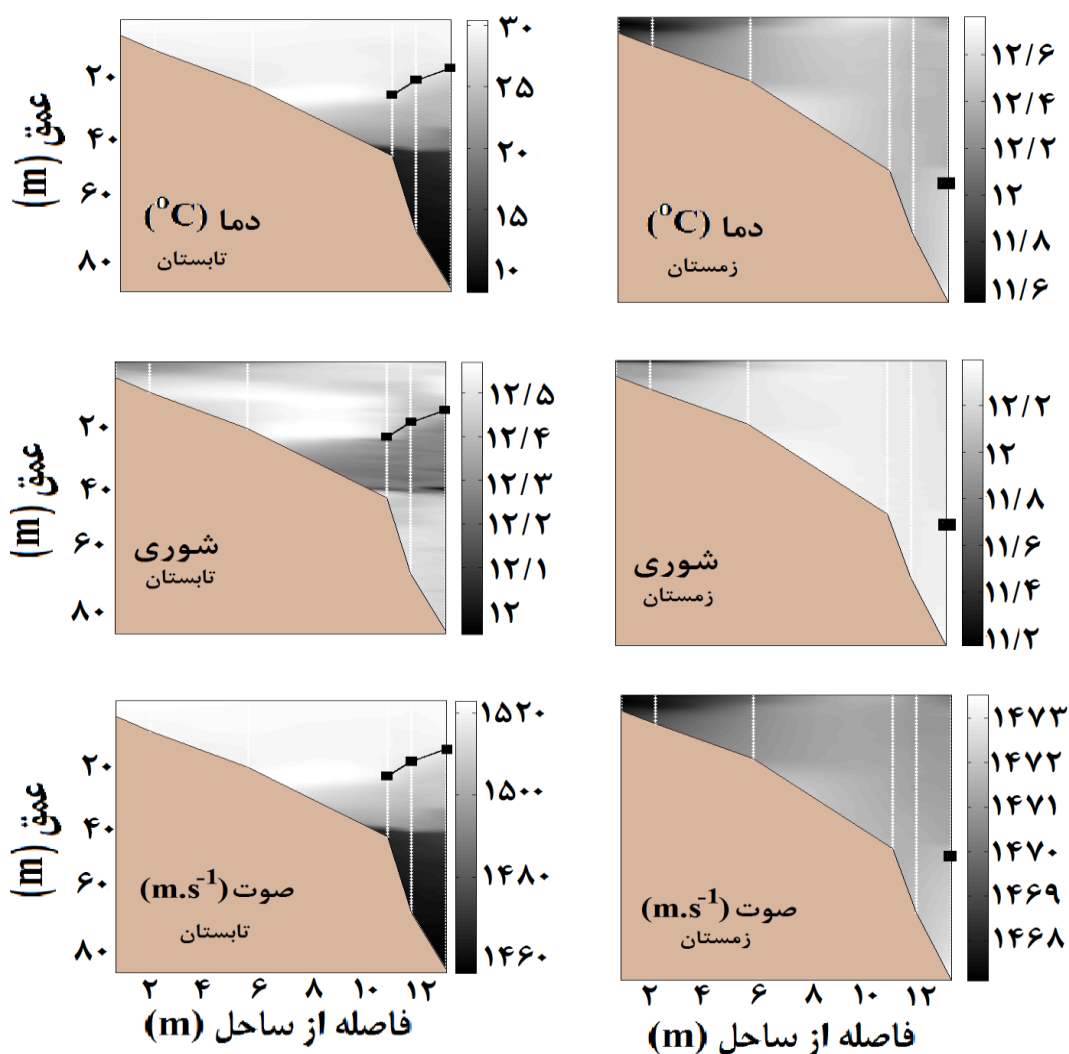
فصل	پارامتر	دامنه تغییرات	عمق لایه آمیخته	عمق پایه ترموکلاین	میانگین لایه آمیخته	میانگین ترموکلاین	میانگین لایه عمیق
تابستان	دما	۸/۳-۳۰/۴			۲۹/۳	۲۱/۵	۱۰/۲
	شوری	۱۱/۹-۱۲/۶	۲۱/۳۲	۴۵	۱۲/۵	۱۲/۳	۱۲/۴
	صوت	۱۴۵۶/۶-۱۵۲۲/۹			۱۵۲۰/۷	۱۵۰۲/۹	۱۴۶۲/۶
زمستان	دما	۱۱/۵-۱۲/۷	۴۷	بستر	۱۲/۲	۱۲/۳	NaN
	شوری	۱۱/۱۵-۱۲/۴			۱۲/۱	۱۲/۳	
	صوت	۱۴۶۷/۱-۱۴۷۲/۵			۱۴۷۰	۱۴۷۲/۴	



شکل (۴) تخمین MLD با استفاده از روش آستانه و مقادیر مختلف آستانه ۰/۱، ۰/۵ و ۱/۲۵ (°C) در فصل‌های گرم و سرد سال؛ (الف) تابستان و (ب) زمستان

مقایسه دما و سرعت صوت در می‌یابیم الگوی صوت به شدت تحت تاثیر الگوی دما و در هر دو فصل گرم و سرد سرعت صوت در سطح بیشینه و در عمق کمینه است. از طرفی MLD که با خطوط سیاه‌رنگ نشان داده شده است، تغییرات بسیار کمی دارد. در حالیکه درست در زیر لایه آمیخته تغییر رنگ کنتور مشاهده می‌شود. سرعت صوت در سطح، در فصل تابستان بیشتر از فصل زمستان است و بیشترین گستره تغییرات آن نیز در تابستان و کمترین آن در زمستان رخ می‌دهد، به طوری که تفاوت سرعت صوت در سطح و عمق در فصل زمستان بسیار ناچیز است.

تغییرات زمانی و مکانی شوری در شکل ۵، با کنتورهای شوری در هر فصل نشان داده شده است. این شکل به طور هم‌زمان تغییرات فصلی و مکانی (به طور هم‌زمان از نزدیک ساحل به دور از ساحل و همچنین از سطح به عمق) را نشان می‌دهد. با اینکه محدوده تغییرات شوری در کل بسیار کم است (از حدود ۱۱/۲ تا ۱۲/۵ (PSU))، الگوی کلی شوری در تمامی فصول به این شکل است که کم‌ترین مقدار در سطح و بیش‌ترین مقدار در عمق مشاهده می‌شود. در فصل تابستان نوسانات شوری درست در زیر لایه آمیخته و در فصل زمستان هالوکلاین در داخل لایه آمیخته قرار دارد. تغییرات فصلی سرعت صوت در منطقه بابلسر در شکل ۵ نشان داده شده است. با



شکل (۵) کنتور دما (°C)، شوری و صوت در فصل‌های تابستان و زمستان سال در منطقه بابلسر، لایه آمیخته در ایستگاه‌های مختلف با خط و مربع سیاه‌رنگ نشان داده شده است.

۵- نتیجه گیری

میانگین شوری در هر دو فصل با یکدیگر قابل مقایسه است. میانگین سرعت صوت در لایه آمیخته در فصل تابستان به شکل معناداری کمتر از فصل زمستان است. تغییرات فصلی دما، شوری و سرعت صوت نشان دهنده نقش غالب دما در تعیین سرعت صوت است ولی نمی توان از نقش شوری نیز چشم پوشی کرد. بیشترین تفاوت میان دما و همچنین سرعت صوت در سطح و در عمق در فصل تابستان و کمترین آن در فصل زمستان مشاهده می شود. مقایسه دما و شوری در فصل تابستان میان نتایج یافته شده در مطالعه حاضر و مطالعه انجام شده در سال ۱۳۹۱ [۱۸] تغییرات قابل توجه سالانه را نشان نمی دهد. مقایسه میان نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر با مطالعه انجام شده در منطقه انزلی، در عمق مشابه نشان می دهد در فصل زمستان سرعت صوت در منطقه مورد مطالعه (۱۴۷۴-۱۴۶۷ متر بر ثانیه)) بالاتر از منطقه انزلی (۱۴۶۴-۱۴۵۴ متر بر ثانیه)) است و در فصل تابستان قابل مقایسه با مطالعه حاضر است. تفاوت سرعت صوت در زمستان در این دو منطقه می تواند به دلیل تفاوت زمان اندازه گیری باشد. اندازه گیری انجام شده در مطالعه حاضر در زمستان ۲۲ ژانویه و اندازه گیری در مطالعه [۱۶] در اواخر زمستان (مارس) انجام شده است. مقایسه میان سرعت صوت در ماه اکتبر ۲۰۱۶ در منطقه بابلسر در مطالعه [۲۰] با مطالعه حاضر (۲۱ ژانویه ۲۰۱۹) نشان می دهد سرعت صوت در سطح در ماه اکتبر (۱۵۰۷ متر بر ثانیه)) به مراتب بیشتر از ماه ژانویه (۱۴۷۳ متر بر ثانیه)) است. با مقایسه مقادیر صوت در مطالعه [۲۰] در منطقه نوشهر در ماه ژانویه و مشابهت آن با نتایج حاصل شده در منطقه مورد مطالعه، این تفاوت را می توان تحت تاثیر تغییرات فصلی دانست.

در مطالعه حاضر پارامترهای فیزیکی آب از جمله دما، شوری، سرعت صوت، MLD و SLD در منطقه بابلسر واقع در جنوب دریای خزر با استفاده از داده های اندازه گیری با دستگاه CTD در دو فصل تابستان و زمستان سال ۱۳۹۷ مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که ترکیب یونی آب خزر متفاوت از آب های آزاد است و فرمول استفاده شده جهت تبدیل رسانایی در دستگاه، طبق استاندارد جهانی است، تصحیحاتی بر روی شوری مطابق مطالعه Peeters و همکاران (۲۰۰۰) انجام شد. در این مطالعه، MLD با استفاده از روش آستانه و با الگوریتم ترکیبی فصلی مقدار آستانه ۱ (°C) در فصل تابستان و آستانه ۰/۱ (°C) در فصل زمستان، محاسبه گردید. بر اساس مطالعات MLD در فصل تابستان به مراتب کمتر از فصل زمستان است. این نتیجه با نتیجه به دست آمده در مطالعات پیشین مشابهت دارد [۱۶-۱۸]. کم عمق بودن MLD در فصل تابستان مربوط به افزایش دمای هوا است و همچنین از طرفی تبخیر باعث افزایش نسبی شوری در سطح و پدیده همرفت را رقم می زند. با سرد شدن هوا در فصل زمستان و کاهش دمای سطح آب، چگالی در سطح افزایش یافته و همرفت را به دنبال می آورد. از طرفی افزایش سرعت باد نیز خود باعث تشدید آشفتگی (Turbulence) و افزایش MLD شده، به طوریکه عمیق ترین MLD در فصل زمستان مشاهده می شود. در فصل تابستان شاهد شیب شدید ترموکلاین و در فصل زمستان کمترین شیب ترموکلاین هستیم. لازم به ذکر است در فصل زمستان تنها لایه آمیخته و ترموکلاین بسیار ضعیف قابل مشاهده است، به طوریکه ترموکلاین از لایه عمیق بسیار مشکل است. میانگین دما در لایه آمیخته در تابستان بیشینه و در زمستان کمینه و

۶- منابع

- [۴] Simpson JH, Sharples J. Introduction to the physical and biological oceanography of shelf seas. Cambridge University Press; ۲۰۱۲ Mar ۲۹.
[۵] Forest A, Coupel P, Else B, Nahavandian S, Lansard B, Raimbault P, Papakyriakou T, Gratton Y, Fortier L, Tremblay JÉ, Babin M. Synoptic evaluation of carbon cycling in the Beaufort Sea during summer: contrasting river inputs, ecosystem metabolism and air-sea CO₂ fluxes. Biogeosciences. ۲۰۱۴ May ۲۷;۱۱(۱۰):۲۸۲۷-۵۶.

- [۱] Stewart RH. Introduction to physical oceanography. Robert H. Stewart; ۲۰۰۸.
[۲] Miksis-Olds JL, Martin B, Tyack PL. Exploring the ocean through soundscapes. Acoust. Today. ۲۰۱۸;۱۴(۱):۲۶-۳۴.
[۳] Lü, Lian-Gang, Hong-Xia Chen, and Ye-Li Yuan. "Spatial and temporal variations of sound speed at the PN section." Journal of oceanography ۶۰, no. ۴ (۲۰۰۴): ۶۷۳-۶۷۹.

- [۱۹] Jamshidi, S., and N. B. Abu Bakar. The sound speed in southern deepwater zone of the Caspian Sea, off Anzali Port. *Acoustical Physics* ۵۷, no. ۲. ۲۰۱۱: ۱۸۰-۱۹۱.
- [۲۰] Jamshidi S, Yousefi M. Experimental Evaluation of the Influence of the Seawater Characteristics on Spatial and Temporal Variations of the Sound Speed in the Southern Abyssal, Intermediate and Shelf Zones of the Caspian Sea. *Acoustical Physics*. ۲۰۲۱ Mar; ۶۷(۲): ۱۳۴-۱۴۶.
- [۲۱] Unesco I, SCOR I. Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater ۱۹۸۰.
- [۲۲] Peeters F, Kipfer R, Achermann D, Hofer M, Aeschbach-Hertig W, Beyerle U, Imboden DM, Rozanski K, Fröhlich K. Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. ۲۰۰۰ Apr ۱; ۴۷(۴): ۶۲۱-۵۴.
- [۲۳] Mackenzie, Kenneth V. Discussion of sea water sound-speed determinations. *The Journal of the Acoustical Society of America* ۷۰, no. ۳ (۱۹۸۱): ۸۰۱-۸۰۶.
- [۲۴] Munk, W, Worcester, P and Wunsch, C. ۱۹۹۵ *Ocean Acoustic Tomography*, ۴۳۲. Cambridge (UK): Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511666926>
- [۲۵] <https://www.seabird.com/eBooks/CTDs-Explained-Sea-Bird-Scientific>.
- [۲۶] Thomson, R. E., and Fine, I. V., ۲۰۰۳, Estimating mixed layer depth from oceanic profile data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, ۲۰, ۳۱۹-۳۲۹.
- [۲۷] Schneider, N., and Müller, P., ۱۹۹۰, The meridional and seasonal structures of the mixed-layer depth and its diurnal amplitude observed during the Hawaii-to-Tahiti Shuttle experiment. *Journal of physical oceanography*, ۲۰, ۱۳۹۵-۱۴۰۴.
- [۲۸] de Boyer Montégut C, Madec G, Fischer AS, Lazar A, Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. ۲۰۰۴ Dec; ۱۰۹(C۱۲).
- [۲۹] Weller RA, Plueddemann AJ. Observations of the vertical structure of the oceanic boundary layer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. ۱۹۹۶ Apr ۱۵; ۱۰۱(C۴): ۸۷۸۹-۸۰۶.
- [۳۰] Kara AB, Rochford PA, Hurlburt HE. An optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. ۲۰۰۰ Jul ۱۵; ۱۰۵(C۷): ۱۶۸۰۳-۲۱.
- [۳۱] Qu T, Du Y, Gan J, Wang D. Mean seasonal cycle of isothermal depth in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. ۲۰۰۷ Feb; ۱۱۲(C۲)
- [۶] Etter, Paul C. Underwater acoustic modeling and simulation. CRC press, ۲۰۱۸.
- [۷] Thomson RE, Fine IV. Estimating mixed layer depth from oceanic profile data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. ۲۰۰۳ Feb; ۲۰(۲): ۳۱۹-۲۹.
- [۸] Su H, Neelin JD, Meyerson JE. Mechanisms for lagged atmospheric response to ENSO SST forcing. *Journal of climate*. ۲۰۰۵ Oct ۱۵; ۱۸(۲۰): ۴۱۹۵-۲۱۵.
- [۹] Yeh SW, Yim BY, Noh Y, Dewitte B. Changes in mixed layer depth under climate change projections in two CGCMs. *Climate dynamics*. ۲۰۰۹ Aug ۱; ۳۳(۲-۳): ۱۹۹-۲۱۳.
- [۱۰] Kostianoy AG, Kosarev AN, editors. The Caspian sea environment. Springer Science & Business Media; ۲۰۰۵.
- [۱۱] Dumont HJ. The Caspian Lake: history, biota, structure, and function. *Limnology and Oceanography*. ۱۹۹۸ Jan; ۴۳(۱): ۴۴-۵۲.
- [۱۲] Zonn IS. Economic and international legal dimensions. In *The Caspian Sea Environment* ۲۰۰۵ (pp. ۲۴۳-۲۵۶). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [۱۳] Zaker NH, Ghaffari P, Jamshidi S. Physical study of the southern coastal waters of the Caspian Sea, off Babolsar, Mazandaran in Iran. *Journal of Coastal Research*. ۲۰۰۷ Jan ۱; ۵: ۵۶۴-۹.
- [۱۴] Farjami H, Hesari AR. Assessment of sea surface wind field pattern over the Caspian Sea using EOF analysis. *Regional Studies in Marine Science*. ۲۰۲۰ Mar ۱; ۳۵: ۱۰۱۲۵۴.
- [۱۵] Farjami, H., Rashidi Ebrahim Hesari, A. Wind-driven Waves Pattern in the Caspian Sea. *Hydrophysics*, ۲۰۲۱; ۶(۲): ۱-۱۱.
- [۱۶] جمشیدی سیامک. تغییرات فصلی پایداری و لایه-بندی ستون آب در بخش عمیق جنوب دریای خزر. *اقیانوس شناسی*. ۱۳۹۴; ۲۲(۲): ۸۳-۹۵.
- [۱۷] عبدالهی، عزیزه نهاوندیان، سمیه. بررسی تغییرات فصلی و مکانی خصوصیات فیزیکی آب در منطقه آلاشت رود و لایوچ رود. *نشریه علمی - پژوهشی هیدروفیزیک*, ۱۳۹۷; ۴(۲): ۴۷-۵۸.
- [۱۸] جان نار فریدون، فاطمه، نهاوندیان اصفهانی، سمیه، محمودی، نعمت‌الله. تغییرات فصلی ستون قائم آب و تخمین عمق لایه آمیخته بر پایه دما با استفاده از روش آستانه در منطقه بابلسر و رامسر. *فیزیک زمین و فضا*. ۱۳۹۹; ۴۶(۱): ۱۷۴-۱۵۹. doi: ۱۰.۲۲۰۵۹/jesphys.۲۰۲۰.۲۸۶۰۸۹.۱۰۰۷۱۵۴