

بررسی و تحلیل مشاهداتی روند تشکیل کانال صوتی و تغییرات سرعت صوت در بخش شرقی آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر

سیامک جمشیدی*^۱، محمدرضا سهیلی فر^۲

Jamshidi@inio.ac.ir

۱- عضو هیأت علمی پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی

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

چکیده

در این تحقیق امکان تشکیل کانال صوتی در آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر پس از اندازه‌گیری میدانی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. پژوهش براساس تحلیل داده‌های حاصل از اندازه‌گیری میدانی در نوار جنوبی دریای خزر صورت گرفته است. محاسبه سرعت صوت مبتنی بر مشاهدات دما، شوری و فشار در آب‌های سواحل جنوبی دریای خزر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات عمودی دما از ۱۷/۹ تا ۹/۲ درجه سانتی‌گراد از سطح تا نزدیکی بستر و تغییرات عمودی شوری بین ۱۲/۶۷-۱۲/۰۶ بوده است. تغییرات عمودی سرعت صوت در ستون آب شدید و بین ۱۴۸۸ متر بر ثانیه در سطح آب دریا تا ۱۴۶۰ متر بر ثانیه در عمق ۴۲ متری است. ساختار عمودی سرعت صوت یک روند کاهش سریع در عرض ترموکلاین را نشان می‌دهد. تغییرات عمودی سرعت صوت از تغییرات عمودی دما پیروی می‌کند که نشان دهنده همبستگی شدید این دو پارامتر فیزیکی در آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر دارد. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که کانال صوتی در آب‌های کم عمق ساحلی بخش شرقی جنوب دریای خزر تشکیل نمی‌شود.

واژگان کلیدی: دریای خزر، سرعت صوت، کانال صوتی، سونار، ترموکلاین.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۴/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۶/۰۴

۱- مقدمه

سرعت صوت در دریا، پارامتر مهم در محاسبات و طراحی دستگاه‌های سونار محسوب می‌شود. دانستن اطلاعات محیطی برای انجام عملیات دفاعی و تهاجمی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و یکی از نکات بسیار مهم در کسب صحیح اطلاعات، راندمان و دقت حسگرهای صوتی مورد استفاده در سونارهای شناورهای سطحی و زیر سطحی است که به طور کامل وابسته به نحوه انتشار صوت در زیر دریا است. به عنوان مثال یکی از تاکتیک‌های بسیار مهم دفاعی زیردریایی، پناه بردن در عمقی است که امواج صوتی حسگرهای شناورهای زیر سطحی، سطحی، هواپیماها و بالگردهای مخصوص اکتشاف زیردریایی غیر خودی به آن نرسد. دانستن چنین عمقی منوط به داشتن اطلاعات مربوط به نحوه انتشار صوت در محیط زیرآبی سه بعدی مورد نظر می‌باشد [۵]. همچنین دانستن شرایط محیطی انتشار امواج برای تست و کالیبراسیون سونارهای طراحی و ساخته شده در محیط مورد نظر بسیار حائز اهمیت است تا متناسب با شرایط محیط سونارهایی بهینه طراحی نمود [۷۶].

تغییرات سرعت صوت در دریا تعیین کننده ویژگی‌های مربوط به انتشار صوت در محیط است و این تغییرات بستگی به نواحی مختلف دریا دارد. سرعت صوت تحت تاثیر عوامل گوناگونی نظیر عمق، فصل، منطقه جغرافیایی، محیط و زمان تغییر می‌کند. از نظر تاریخی اولین کوششی که برای اندازه‌گیری سرعت صوت انجام گرفت در سال ۱۸۲۷ توسط وود کلادن و اشتورم بود. به‌طور کلی سرعت امواج صوتی که در داخل آب حرکت می‌کنند توسط سه پارامتر فشار (ناشی از افزایش عمق)، درجه حرارت و شوری کنترل می‌شود. تعیین سرعت صوت در آب دریاها یک بخش کلیدی از تشریح مدرن آب‌های روی کره زمین است. در این مقاله، به تشریح یافته‌هایی از سرعت صوت در بخش جنوبی دریای خزر پرداخته می‌شود. در اقیانوس‌شناسی و پژوهش‌های دریایی، پالس‌های صوتی به طور وسیع در بررسی‌های بستر دریا و اندازه‌گیری موج و جریان‌ات دریایی استفاده می‌شود. دانستن مطالبی در مورد سرعت صوت، اطلاعات مفیدی در مورد ویژگی‌های اقیانوس و آب دریا در اختیار قرار می‌دهد. اخیراً، محاسبه صوت برای مشاهدات لایه‌های پایینی آب دریاها و

دریای خزر با حجمی حدود ۷۸۰۰۰ کیلومتر مکعب و مساحت ۴۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع و نوار ساحلی در حدود ۷۵۰۰ کیلومتر (حدود ۲۷ متر پایین‌تر از سطح اقیانوس ها)، بزرگ‌ترین دریای بسته جهان محسوب می‌شود. این دریا با ویژگی‌هایی نظیر داشتن ذخایر غنی هیدروکربنی (نفت و گاز) و منابع زیستی مشخص می‌شود. دریای خزر در حدود ۱۰۳۰ کیلومتر از جنوب تا شمال بین ۳۶ تا ۴۸ درجه شمالی عرض جغرافیایی و از غرب تا شرق، با پهنا‌ی بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر بین ۴۸ تا ۵۴ درجه شرقی طول جغرافیایی گسترده شده است [۳-۱]. از لحاظ جغرافیایی، این دریا بین کشورهای روسیه، قزاقستان، ایران، ترکمنستان و آذربایجان قرار دارد. این دریا به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی به ترتیب با بیشترین عمق ۲۰، ۷۸۸ و ۱۰۲۵ متر تقسیم می‌شود و میانگین عمق آن در حدود ۲۰۷ متر است. خط ساحلی ایران در حدود ۹۰۰ کیلومتر سرتاسر قسمت جنوبی دریای خزر را فرا گرفته است. به دلیل گسترش نصف النهاری دریای خزر، چندین منطقه آب و هوایی روی این دریا وجود دارد. قسمت جنوبی دریای خزر آب و هوای نیمه استوایی (نیمه حاره‌ای) دارد. در زمستان، آب و هوای کم فشار و در تابستان، آب و هوای مرطوب و پایدار در قسمت جنوبی آن حاکم است. نواحی ساحلی جنوبی دریای خزر تابستان‌های گرم، زمستان‌های معتدل و ملایم دارند. معمولاً بیشترین و کمترین میزان دما به ترتیب در ماه‌های میانی تابستان و زمستان ثبت می‌شود. در این منطقه سرعت باد معمولاً به ۳ تا ۴ متر بر ثانیه می‌رسد و بادهای ضعیف نرخی حدود ۹۰٪ کل بادهای این منطقه را تشکیل می‌دهد. در فصل زمستان دمای هوا حدود ۱۲-۸ درجه سانتی‌گراد و در تابستان حدود ۲۶-۲۴ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به عدم اتصال دریای خزر به آب‌های آزاد دنیا، تشکیل لایه شیب دما- شوری (ترموهالین) تحت تاثیر شرایط جوی روی دریا و میزان ورودی آب شیرین به آن است. از منظر بزرگ مقیاس تغییرات ساختار شیب دما- شوری (ترموکلین) تا حد زیادی توسط خروجی رودخانه‌ها، شارش گرما و آب شیرین در سطح دریا کنترل می‌شود [۴].

دستگاه با محیط اطراف و بهترین برداشت داده، سرعت ارسال دستگاه در ستون آب یک متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. داده‌ها در راستای مقاطع عرضی عمود و موازی ساحل شامل ایستگاه‌های اندازه‌گیری برداشت و در انتهای عملیات‌ها تخلیه شدند. داده‌های پارامترهای فیزیکی دریا با استفاده از سنسورهای دستگاه CTD قابل حمل در ۱۳ ایستگاه با فواصل ۲ کیلومتر و از سطح آب دریا تا نزدیکی بستر در عمق ۴۲ متری در آبهای ساحلی بابلسر اندازه‌گیری شده است. این تحقیق براساس عملیات‌های میدانی انجام شده در دوره زمانی فصول تابستان و پاییز در آبهای ساحلی جنوب دریای خزر می‌باشد.

۲-۲- تصحیحات مقادیر شوری و چگالی

با توجه به مشخصات و ترکیبات منحصربه‌فرد آب دریای خزر و تفاوت شوری و در نتیجه چگالی آن با دیگر دریاهای آزاد دنیا، نیاز است داده‌های شوری و چگالی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه CTD اصلاح شود، که روند محاسبه آن در فرمول‌بندی ارائه شده توسط UNESCO به صورت فرمول ۱ و ۲ است [۱۱ و ۱۲]. بنابراین لازم است به منظور دستیابی به اعداد دقیق، ضرایب تصحیح در روابط و نحوه محاسبه پارامترهای شوری و چگالی مورد استفاده قرار گیرند. چندین رابطه حاصل از مطالعات آزمایشگاهی، تجربی و شیمیایی برای محاسبه شوری و چگالی آب دریا وجود دارد. (Millero and Chetkin, 1980) اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را در خصوص بررسی مشخصات شیمیایی آب دریا با استفاده از چندین نمونه آب برداشت شده از سطح دریا در نزدیکی بندر نوشهر در بخش جنوبی دریای خزر انجام دادند [۱۳] و روابطی را برای محاسبه شوری و چگالی آب دریای خزر ارائه نمودند. در راستای تکمیل و تدقیق روابط فوق، (Peeters et al., 2000) [۱۴] با استفاده از داده‌های برداشت شده از دریای خزر توسط سازمان انرژی اتمی (IAEA, 1996) روابطی را برای کالیبراسیون مقادیر داده‌های شوری و چگالی آب دریای خزر را ارائه کردند که در روابط ۱ و ۲ آورده شده است [۸]. در تحقیق حاضر نیز از روابط زیر که دقیق‌تر از موارد قبلی بیان گردیده، استفاده شده است. این روابط توسط (Peeters et al., 2000) ارائه شده [۱۴] و توسط برخی از محققین ایرانی نیز استفاده شده است [۹ و ۸].

اقیانوس‌ها بسیار پیشرفت کرده است. میانگین سرعت صوت در دریاها در حدود ۱۴۴۵ متر بر ثانیه است. سرعت صوت در آب دریاها با افزایش دما، شوری و فشار (عمق) افزایش می‌یابد. دما در سرعت صوت به شدت تاثیرگذار است، به طوری که افزایش سرعت صوت در آب گرم بیشتر از آب سرد است و به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش دما، سرعت حدود ۴/۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. در لایه سطحی، روی لایه ترموکلاین سرعت صوت با افزایش عمق تغییر اندکی داشته، در عرض لایه ترموکلاین سرعت صوت خیلی سریع و شدید افت پیدا کرده اما در زیر لایه ترموکلاین به دلیل افزایش فشار، سرعت صوت افزایش می‌یابد. از جمله مطالعاتی که به منظور بررسی پارامترهای فیزیکی آب دریا به‌ویژه سرعت صوت در آب در مناطق جنوبی دریای خزر انجام شده است می‌توان به مطالعات مراجع [۸-۱۰] اشاره نمود. هدف از این تحقیق، بررسی و تحلیل مشاهداتی روند تشکیل کانال صوتی و تغییرات سرعت صوت در بخش شرقی آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر است. در این راستا تغییرات عمودی برخی از پارامترهای فیزیکی آب دریا نظیر دما، شوری و سرعت صوت براساس اندازه‌گیری‌های میدانی در آب‌های ساحلی بندر بابلسر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری‌های میدانی

این تحقیق منطقه مستطیل شکلی در موقعیت $36^{\circ} 45'$ عرض جغرافیایی شمالی و $52^{\circ} 38'$ طول جغرافیایی شرقی را دربر می‌گیرد که مطابق شکل (۱)، محدوده‌ای با طول ۱۰ کیلومتر و عرض ۹ کیلومتر در سواحل بابلسر را شامل می‌شود. در این منطقه عرض فلات قاره حدود ۱۰ کیلومتر است. عمق آب دریا به آرامی از ساحل تا نزدیکی منطقه شکست فلات قاره افزایش می‌یابد، پس از آن با یک افزایش شدید، شیب در حدود ۱۸ کیلومتر از نوار ساحلی به عمق ۴۰۰ متر می‌رسد.

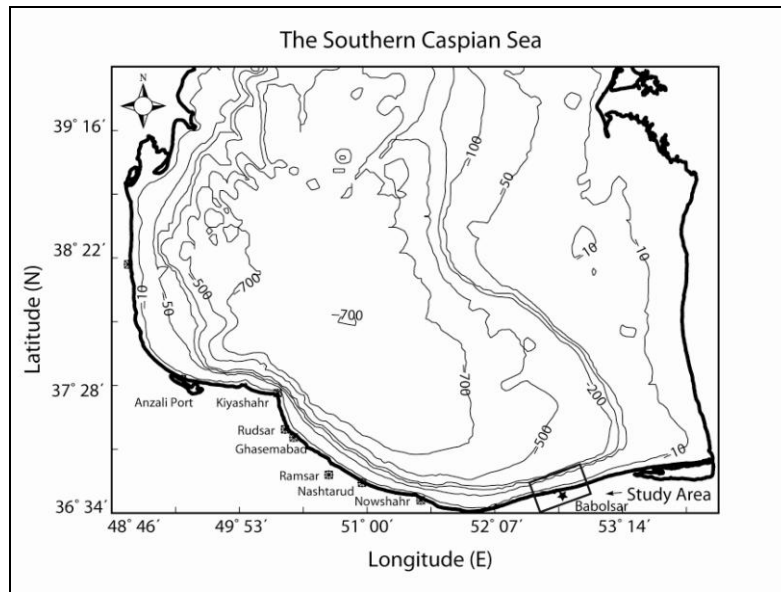
اندازه‌گیری‌ها از سطح تا عمق دربرگیرنده آب‌های سطحی، و عمقی در راستای ایستگاه‌های مورد نظر طراحی و اجرا شده است. بدین منظور یک دستگاه CTD ایدروانات ساخت ایتالیا در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به کمک وینچ و کابل مستقر روی عرشه شناور مورد استفاده از سطح تا بستر دریا فرستاده شد. به منظور تطابق خوب سنسورهای

درجا (*In Situ*) است و $f(T, p)$ ضریب تصحیح می‌باشد. $\rho_{Sea}(T, 0, P)$ چگالی آب با استفاده از فرمول‌های یونسکو (UNESCO, 1981a; UNESCO, 1981b) و با استفاده از اندازه‌گیری‌های دما و فشار و با احتساب شوری صفر است [۱۰].

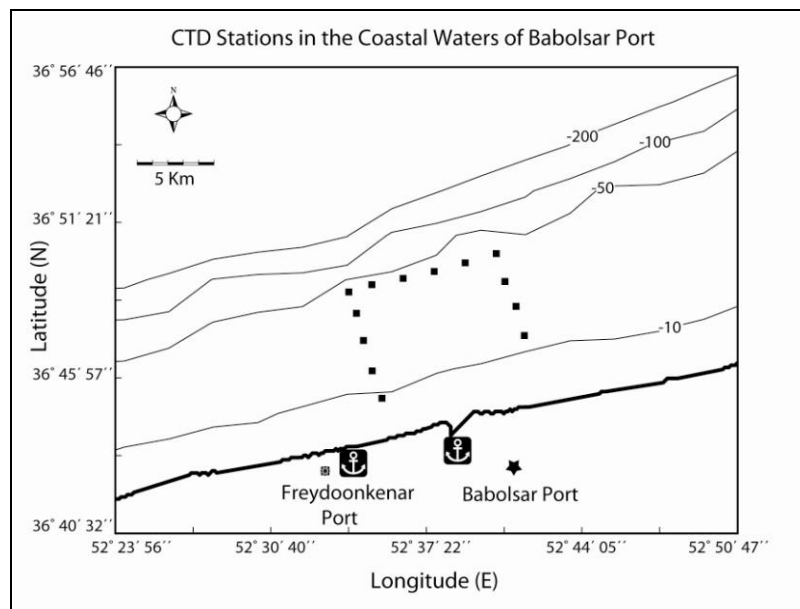
$$S_{Caspian} = 1.1017S_{CTD} \quad (۱)$$

$$\rho_{Solution}(T, S, p) = \rho_{Sea}(T, 0, p) + f(T, p)(\rho_{Sea}(T, S, p) - \rho_{Sea}(T, 0, p)) \quad (۲)$$

که در آن $\rho_{Sea}(T, S, P)$ چگالی آب با استفاده از فرمول‌های یونسکو (UNESCO, 1981a; UNESCO, 1981b) با جایگذاری دما، شوری و فشار اندازه‌گیری شده



(الف)



(ب)

شکل (۱) الف) منطقه مورد مطالعه در مرز جنوبی دریای خزر (ب) جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری و موقعیت آن‌ها در آب‌های ساحلی بابلسر

که در محدوده‌ی دمایی بین ۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس، شوری ۰ تا ۴۰ ppt و فشار ۰ تا ۱۰۰۰ بار مقدار صحیح تری را به ما می‌دهد. مقادیر ضرایب مندرج در فرمول‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) ضرایب محاسبه سرعت صوت [۱۷-۱۸]

Coefficients	Numerical values	Coefficient	Numerical values
C ₀₀	1402.388	A ₀₂	7.166E-5
C ₀₁	5.03830	A ₀₃	2.008E-6
C ₀₂	-5.81090E-2	A ₀₄	-3.21E-8
C ₀₃	3.3432E-4	A ₁₀	9.4742E-5
C ₀₄	-1.47797E-6	A ₁₁	-1.2583E-5
C ₀₅	3.1419E-9	A ₁₂	-6.4928E-8
C ₁₀	0.153563	A ₁₃	1.0515E-8
C ₁₁	6.8999E-4	A ₁₄	-2.0142E-10
C ₁₂	-8.1829E-6	A ₂₀	-3.9064E-7
C ₁₃	1.3632E-7	A ₂₁	9.1061E-9
C ₁₄	-6.1260E-10	A ₂₂	-1.6009E-10
C ₂₀	3.1260E-5	A ₂₃	7.994E-12
C ₂₁	-1.7111E-6	A ₃₀	1.100E-10
C ₂₂	2.5986E-8	A ₃₁	6.651E-12
C ₂₃	-2.5353E-10	A ₃₂	-3.391E-13
C ₂₄	1.0415E-12	B ₀₀	-1.922E-2
C ₃₀	-9.7729E-9	B ₀₁	-4.42E-5
C ₃₁	3.8513E-10	B ₁₀	7.3637E-5
C ₃₂	-2.3654E-12	B ₁₁	1.7950E-7
A ₀₀	1.389	D ₀₀	1.727E-3
A ₀₁	-1.262E-2	D ₁₀	-7.9836E-6

۳- یافته‌ها و بحث

سرعت صوت در آب شیرین تابع دما است. دو عامل اضافی دیگر بر سرعت صوت در آب دریا تأثیر دارند که شامل شوری آب و تغییرات فشار است که بر حسب تغییر ژرفای آب پیدا می‌شود. هر کدام از این دو عامل موجب افزایش سرعت صوت هستند. نیم‌رخ‌های عمودی پارامترهای فیزیکی آب دریا نظیر سرعت صوت، دما، شوری و فشار بر حسب عمق در آب دریا در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در آب‌های ساحلی بابل در شکل (۲الف) ارائه شده است. با کمی دقت و توجه در ساختار عمودی پارامترهای مختلف فیزیکی می‌توان دریافت که در زمان اندازه‌گیری داده‌ها ساختار سرعت صوت تا حد زیادی به تغییرات درجه حرارت آب دریا شباهت دارد و تحت تأثیر آن هست.

۲-۳- محاسبه سرعت صوت

روابط متعددی برای محاسبه سرعت صوت در آب دریاها وجود دارد که در آنها معمولاً با داشتن دما، فشار (عمق) و شوری، که توسط سنسورهای CTD اندازه‌گیری می‌شوند، سرعت صوت به راحتی محاسبه می‌شود. یکی از این روابط، فرمول Mackenzie با شرح زیر می‌باشد [۱۵].

$$c(D, S, T) = 1448.96 + 4.591 T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 + 2.374 \times 10^{-4} T^3 + 1.340 (S - 35) + 1.630 \times 10^{-2} D + 1.675 \times 10^{-7} D^2 - 1.025 \times 10^{-2} T (S - 35) - 7.139 \times 10^{-13} T D^3 \quad (1)$$

که T دما بر حسب درجه سلسیوس، S شوری با واحد ppt و D عمق بر حسب متر است. همچنین فرمول Coppens به صورت زیر می‌باشد [۱۶].

$$c(D, S, T) = c(0, S, t) + (16.23 + 0.253 t) D + (0.213 - 0.1 t) D^2 + [0.016 + 0.0002 (S - 35)] (S - 35) t D \quad (2)$$

$$c(0, S, T) = 1449.05 + 45.7 t - 5.21 t^2 + 0.23 t^3 + (1.333 - 0.1261 t + 0.009 t^2)(S - 35) \quad (3)$$

که t برابر با T/10 و عمق بر اساس کیلومتر می‌باشد. اما فرمول بین‌المللی استاندارد که اکثراً با نام UNESCO جهت محاسبه سرعت صوت استفاده می‌شود برطبق فرمول‌های ارائه شده توسط Chen and Millero و همچنین Wong and Zhu [۱۷-۱۸] است که فرمول دقیق‌تری به نسبت فرمول‌های ساده بالا است.

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P) S + B(T, P) S^{3/2} + D(T, P) S^2 \quad (4)$$

$$C_w(T, P) = (C_{00} + C_{01} T + C_{02} T^2 + C_{03} T^3 + C_{04} T^4 + C_{05} T^5) + (C_{10} + C_{11} T + C_{12} T^2 + C_{13} T^3 + C_{14} T^4) P + (C_{20} + C_{21} T + C_{22} T^2 + C_{23} T^3 + C_{24} T^4) P^2 + (C_{30} + C_{31} T + C_{32} T^2) P^3 \quad (5)$$

$$A(T, P) = (A_{00} + A_{01} T + A_{02} T^2 + A_{03} T^3 + A_{04} T^4) + (A_{10} + A_{11} T + A_{12} T^2 + A_{13} T^3 + A_{14} T^4) P + (A_{20} + A_{21} T + A_{22} T^2 + A_{23} T^3) P^2 + (A_{30} + A_{31} T + A_{32} T^2) P^3 \quad (6)$$

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01} T + (B_{10} + B_{11} T) P \quad (7)$$

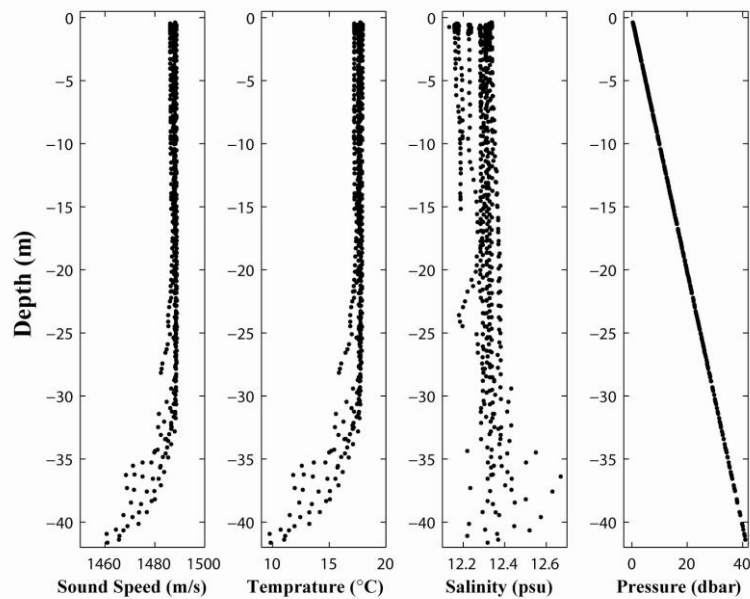
$$D(T, P) = D_{00} + D_{10} P \quad (8)$$

در زیر لایه ۳۰ متر تغییرات پارامترهای فیزیکی افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین نتایج تحقیق و اجرای رگرسیون مدل نشان دهنده همبستگی شدید داده‌های سرعت صوت و درجه حرارت آب دریا است که علت آن پایین بودن میزان شوری آب دریای خزر می‌باشد. براساس مطالعات انجام شده و داده‌های برداشت شده در آبهای ساحلی جنوب دریای خزر مشاهده شده است که در ماه‌های سرد سال که مقدار دمای آب لایه‌های نزدیک به سطح دریای خزر نسبت به اواخر بهار تا میانه پاییز کم می‌شود، اثر میزان شوری بر پارامترهای سرعت صوت و چگالی که تابعی از دما، شوری و فشار هستند ملموس‌تر است و ضریب همبستگی سرعت صوت و چگالی با پارامتر دما کمتر می‌شود. مهم‌ترین عاملی که واگرایی ساده و انتشار مستقیم تابع صوتی در آب دریا را تغییر می‌دهد، پدیده شکست است که در اثر تغییر سرعت انتشار حاصل می‌گردد. عوامل موثر بر ساختار فیزیکی ستون آب و پارامترهای فیزیکی آن نظیر سرعت صوت در آب دریا، دما و شوری ورودی آب رودخانه‌ها، تغییرات اقلیمی و عوامل جوی است. تغییرات شوری در نزدیکی دهانه رودخانه‌های بزرگ دارای اهمیت است، زیرا در آنجا مقدار زیادی آب شیرین وارد دریا می‌شود. در برخی موارد تغییرات شوری آب دریا در نزدیکی مصب ورودی رودخانه‌ها که آب شیرین را وارد دریا می‌کنند ملموس‌تر است. از جمله ورودی رودخانه بابل‌رود نیز در آب‌های ساحلی مجاور دهانه بابل‌رود مشاهده می‌شود. معمولاً خروجی رودخانه‌ها در مناطق ساحلی همراه با ورود رسوبات و مواد معلق در منطقه است که باعث افزایش کدروی آب در نزدیکی مصب رودخانه‌ها می‌گردد. البته ذرات معلق بر سرعت صوت در آب تأثیر محدودی دارد. لازم به توضیح است که تغییرات سرعت صوت در مناطق دهانه‌ای و مصب رودخانه‌ها از سطح تا نزدیکی بستر در ستون آب عمدتاً زیاد و چشمگیر است. اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که در لایه‌های بالایی به‌ویژه در نزدیکی سطح دریا، که عامل‌هایی چون تغییر اقلیم فصلی، روزانه و اندرکنش هوا و دریا اثرگذار است، گرادیان عمودی و افقی سرعت صوت

از آنجاییکه سرعت صوت در دریا تابعی از دما، شوری و فشار آب دریاست، براین اساس و با توجه به تغییرات کم مقدار شوری آب دریای خزر، اثر دما در مقایسه با اثر شوری در تعیین ساختار عمودی سرعت صوت در ماه‌های گرم سال بیشتر است، و در فصول سرد از اثر آن در مقابل اثر شوری و فشار کاسته می‌شود. به منظور ارائه و بررسی توده‌های مختلف آب دریا در لایه‌های مختلف ستون آب، T-S-D دیاگرام بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده در شکل شماره (۲) نشان داده شده است.

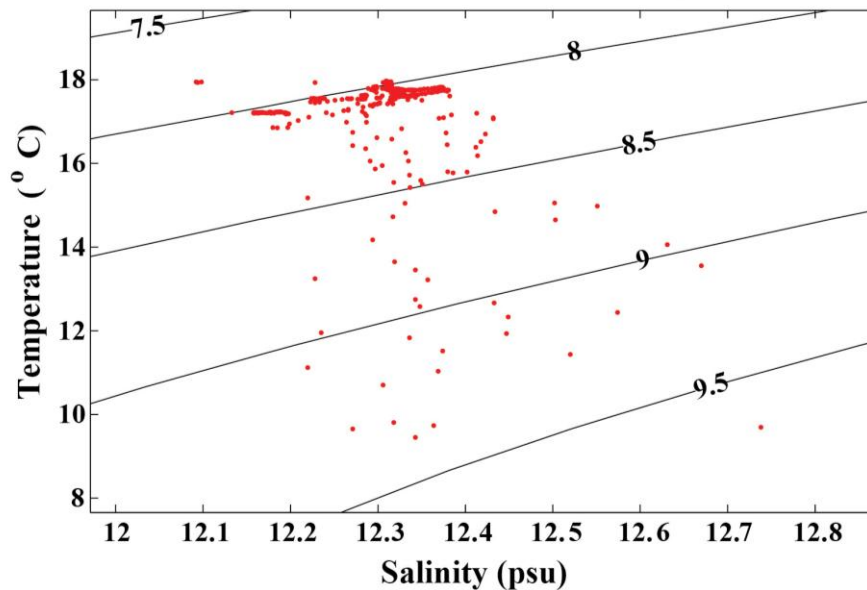
گراف سه بعدی دما، شوری و سرعت صوت پارامترهای در آب دریا در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در آب‌های ساحلی بندر بابلسر در شکل (۳الف) ارائه شده است. معمولاً با استفاده از نمودار دما، شوری و سرعت صوت می‌توان تغییرات سرعت صوت را در توده‌ها و لایه‌های مختلف آب دریا بررسی نمود. همچنین به منظور بررسی همبستگی بین داده‌های سرعت صوت با دما و داده‌های سرعت صوت با میزان شوری آب دریا، داده‌های اندازه‌گیری شده در قالب گراف پراکندگی در شکل شماره (۳ب) نشان داده شده است.

در نمودارهای قبل ساختار عمودی پارامترهای فیزیکی آب دریا نظیر سرعت صوت، دما، شوری و فشار در منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری در آب‌های ساحلی بندر بابلسر ارائه شده است. تغییرات سرعت صوت از ۱۴۸۸ متر بر ثانیه در سطح آب دریا تا ۱۴۶۰ متر بر ثانیه در عمق ۴۲ متری در زمان اندازه‌گیری‌ها در اواخر تابستان تا میانه پاییز مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارها به وضوح مشاهده می‌شود که در لایه آمیخته سطحی که تا ژرفای ۳۰ متر ادامه دارد، تغییرات درجه حرارت و سرعت صوت تقریباً کم است و می‌توان اذعان نمود که تغییرات محسوسی ندارند. داده‌های برداشت شده در آب‌های ساحلی بخش جنوبی دریای خزر به خوبی نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بین پارامتر سرعت صوت در آب دریا و دمای آب معمولاً نزدیک به یک بوده است در حالیکه این فاکتور بین سرعت صوت و شوری آب به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر بدست آمده است.



(الف)

TSD Plot for Coastal Waters off Babolsar, Caspian Sea, 2008



(ب)

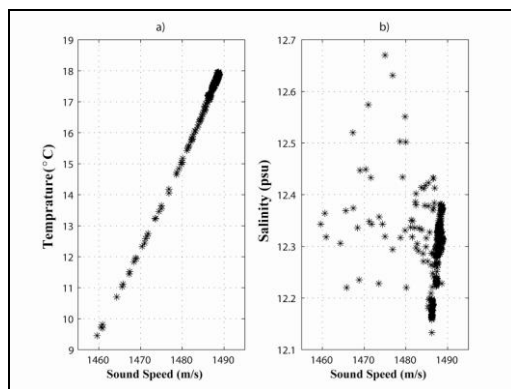
شکل (۲) (الف) نیم‌رخ عمودی سرعت صوت، دما، شوری و فشار (ب) دیاگرام T-S-D بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده

تغییرات سرعت صوت در آب دریا پدیده قابل توجهی است. این حالت زمانی بیشتر محسوس است که انرژی جنبشی ستون آب دریا بیشتر است و تنش ناشی از وزش باد بر روی سطح آب افزایش می‌یابد. نمودار نیم‌رخ عمودی به وضوح نشان داد که گرادیان عمودی سرعت صوت از سطح تا عمق ۳۰ متر تقریباً ناچیز بوده است. در زیر لایه اختلاط سطحی، یا همان لایه شیب حرارتی که

می‌تواند زمینه ساز ایجاد کانال صوتی باشد. نتایج تحقیق نشان داد که مقادیر سرعت صوت در آبهای مرزی جنوب دریای خزر در مقایسه با سرعت صوت در آب دریاها و اقیانوسهای آزاد کمتر بوده است. همچنین در مناطق ورودی رودخانه‌ها و نواحی مجاور جریان‌های بزرگ مقیاس درونی غرب به شرق دریا (و حتی در مجاورت سطح دریا که باران و تبخیر حداکثر اثر خود را دارند)

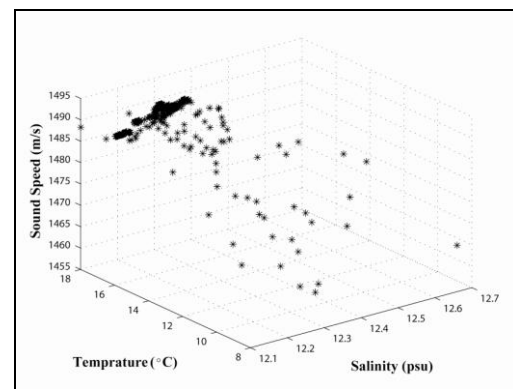
منطقه مورد مطالعه در مقایسه با اندازه‌گیری‌های سرعت صوت در دریاها و اقیانوس‌های آزاد پایین‌تر بوده است که علت این اختلاف را می‌توان تا حدودی در پایین بودن مقادیر شوری آب دریای خزر جستجو نمود.

براساس پژوهش‌های قبلی انجام شده در دریای خزر که بخشی از آنها در این نوشتار اشاره شد، تغییرات فصلی پارامترهای فیزیکی آب دریا در مرز جنوبی خزر عمدتاً در ۵۰ متر بالایی صورت می‌گیرد. عمق یاد شده معمولاً لایه‌های اختلاط سطحی و شیب دمایی را در بر می‌گیرد. پدیده شکست امواج صوتی که خیلی زیاد مورد توجه محققین است در اعماق کم مشاهده نمی‌شود. در لایه‌های کم عمق و ترموکلاین تغییرات پارامترهای فیزیکی آب دریا در تمام فصول سال وجود دارد و در این نواحی امواج صوتی حداکثر سرعت را دارند.



(ب)

تغییرات دما زیاد است، تغییرات سرعت انتشار صوت که در نتیجه تغییرات دما حاصل می‌شود زیاد و چشمگیر بوده است. در تحقیق حاضر اندازه‌گیری‌ها در منطقه ساحلی و کم ژرفا انجام شده که سرعت صوت در آن زیاد است. بنابراین انتظار نمی‌رود که کانال صوتی خاصی وجود داشته باشد. این نتیجه از نمودارهای ترسیم شده برای پارامترهای فیزیکی آب دریا نظیر سرعت صوت و دما نیز قابل تشخیص است. نمودارهای ترسیم شده دما-شوری-چگالی و سرعت صوت-دما-شوری در شکل‌های ۲ و ۳ وضعیت پراکندگی و قرارگیری داده‌های برداشت شده را نشان می‌دهد. داده‌ها عمدتاً در دو بخش مربوط به لایه مخلوط سطحی و شیب دمایی است و بعضاً داده‌های با شوری زیاد هم که از نزدیک بستر دریا ثبت شده مشاهده می‌شود. دامنه قرارگیری اعداد ثبت شده در زمان گرم



(الف)

شکل (۳) (الف) گراف سه بعدی دما، شوری و سرعت صوت (ب) قالب‌های پراکندگی بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده

۴- نتیجه‌گیری

ماه‌های گرم لایه‌بندی فصلی قوی‌تری در ستون آب ایجاد می‌گردد. با توجه به همبستگی زیاد چگالی و دمای آب دریا لایه شیب چگالی و شیب دمایی در یک تراز قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد در زمان‌هایی که خطوط هم دما و هم چگالی شیب بیشتری داشته و در ستون آب تلاطم ناشی از اندرکنش جو و دریا بیشتر است باعث ایجاد جریان‌های قوی‌تری شود. مقایسه نیمرخ‌های عمودی چگالی در فصول مختلف منتج از تحقیق حاضر و دیگر پژوهش‌ها نشانگر مشابهت روند و الگوی تغییرات چگالی آب دریا در حوضه جنوبی دریای خزر است. همان‌طوری‌که در متن هم اشاره شد، یکی از ویژگی‌های آب دریای خزر مطابقت و هماهنگی تغییرات چگالی و درجه حرارت آب دریا است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که لایه‌بندی چگالی ستون

مباحث مربوط به انتشار صوت، سونار، کانال‌های صوتی و مواردی از این قبیل که به همراه اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی همراه است کمک شایانی به ارتقای سطح علمی و توان مهندسی کشور در به ثمر رسیدن تحقیقات دریایی می‌نماید. در این تحقیق روند تشکیل کانال صوتی و تغییرات سرعت صوت در بخش شرقی آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر بررسی شد. برپایه یافته‌های حاصل از این تحقیق و مقایسه آن با مطالعات انجام شده مشاهده شد که لایه‌بندی ستون آب دریا در بخش شرقی مرز جنوبی دریای خزر در مجاورت بندر بابلسر فصلی است و عمدتاً از دو لایه (مخلوط بالایی و شیب دمایی) تشکیل شده است. همچنین به خوبی می‌توان دریافت که در

- Kostianoy and A. N. Kosarev, Springer-Verlag, Berlin, (2005) 1-3.
- [5] P. Xie et al., "Aqua-Sim: An NS-2 Based Simulator for Underwater Sensor Networks," in Proc. MTS/IEEE Oceans, Biloxi, (2009).
- [6] M. Breitzke, O. Boebel, S. El Naggar, W. Jokat, B. Werner, "Broad-band calibration of marine seismic sources used by R/V Polarstern for academic research in polar regions", Geophysical journal international, vol. 174, Issue 2, (2008) 505-524.
- [7] CEI IEC 60565 Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz, (2006- 2011).
- [8] IAEA, "Data measurement and technical report", *Inte. Atom. Ener. Agen., Vienna, Rep.* (1996).
- [9] N. H. Zaker, P. Ghaffari and S. Jamshidi, "Physical Study of the Southern Coastal Waters of the Caspian Sea, off Babolsar, Mazandaran in Iran", *J. Coastal Res.* 50, (2007) 564-569.
- [10] S. Jamshidi and N. Bakar, "Seasonal Variations in Temperature, Salinity and Density in the Southern Coastal Waters of the Caspian Sea", *Oceanology*, 52(3) (2012) 380-396.
- [11] UNESCO. 1981a. Background papers and supporting data on the International Equation of state of Sea Water 1980. UNESCO technical papers in marine science, Nr. 38.
- [12] UNESCO. 1981b. Background papers and supporting data on the practical salinity scale 1978. UNESCO technical papers in marine science, Nr. 37.
- [13] Millero F J, Chetirkin P V. 1980. The density of the Caspian Sea waters. *J. Deep-Sea Research*, 27A: 265-271.
- [14] Peeters F et al. 2000. Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers. *Journal of Deep-Sea Research*, I 47: 621-654.
- [15] K. V. Mackenzie, "Nine term equation for the sound speed in the oceans", *J. Acoust. Soc. Am.* 70, (1981) 807.
- [16] A. B. Coppens, "Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters", *J. Acoust. Soc Am.* 62(5) (1981) 862-863.
- [17] C. T. Chen and F. J. Millero, "Speed of Sound in seawater at high pressures", *J. Acoust. Soc. Am.* 62 (1977) 1129-1135.
- [18] G. S. K. Wong and S. Zhu, "Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure", *J. Acoust. Soc. Am.* 97(3) (1995) 1732-1736

آب دریای خزر مشابه لایه‌بندی حرارتی باشد که این هم با مقایسه نیمرخ‌های عمودی درجه حرارت و چگالی به خوبی مشهود است. همچنین با توجه به همبستگی زیاد سرعت صوت در دریا و دمای آب نیمرخ‌های عمودی دو پارامتر مذکور مشابه هم بوده است. به عبارتی دیگر تغییرات عمودی سرعت صوت از تغییرات عمودی دما پیروی می‌کند که نشان دهنده همبستگی شدید این دو پارامتر فیزیکی در آب‌های ساحلی جنوب دریای خزر دارد. آب دریا شامل بخش‌های مختلف ناهمگون است که می‌توان از موارد آن به لایه‌های حباب نزدیک سطح، مواد معدنی معلق، و ارگانسیم‌های زنده اشاره نمود. فاکتورهای مذکور عوامل پراکنده‌ساز امواج صوتی بویژه در فرکانسهای بالا و در برخی موارد کاهش‌دهنده سرعت صوت در آب دریا هستند. براساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که کانال صوتی در آب‌های کم عمق ساحلی بخش شرقی جنوب دریای خزر تشکیل نمی‌شود. با توجه به اهمیت دریای خزر در منطقه اوراسیا به عنوان یک دریای بین قاره‌ای با موقعیت خاص جغرافیایی و سیاسی و همچنین حساسیت‌های نظامی و اقتصادی این منطقه لزوم پایش و مطالعات مستمر و مداوم در بخش‌های مختلف آن بسیار حائز اهمیت است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب دریای خزر با مشخصات دیگر دریاها و اقیانوس‌های آزاد دنیا تا حدودی متفاوت است. از اینرو مطالعات گسترده و پایش مستمر برای بررسی تغییرات پارامترهای مختلف آب دریا ضروری است.

۴- سپاسگزاری

این تحقیق با پشتیبانی تجهیزاتی پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی به انجام رسید.

۵- مراجع

- [1] H. J. Dumont, "The Caspian Lake: history, biota, structure, and function", *Limnology Oceanography*, 43(1), (1998) 44-52.
- [2] I. S. Zonn, In *The Caspian Sea Environment*, Ed. by A. G. Kostianoy and A. N. Kosarev, Springer-Verlag, Berlin, (2005) 223-242.
- [3] I. S. Zonn, In *The Caspian Sea Environment*, Ed. by A. G. Kostianoy and A. N. Kosarev Springer-Verlag, Berlin, (2005) 243-256.
- [4] A. N. Kosarev and A. G. Kostianoy, In *The Caspian Sea Environment*, Ed. by A. G.