

# بررسی نحوه انتشار صوت در لایه ترموکلاين در جنوب دریای خزر (سواحل بابلسر)

محمد اکبری نسب  
استادیار گروه فیزیک دریا  
دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی  
دانشگاه مازندران  
akbarinasabm@yahoo.com

فردین هادی\*  
کارشناسی ارشد فیزیک دریا  
دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی  
دانشگاه مازندران  
fardinhadii@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۳

## چکیده

اقیانوس به عنوان محیطی سیال، امواج صوتی را در خود منتشر می کند. همچنین، نحوه انتشار امواج صوتی در دریا با نیمرخ سرعت صوت ارتباط نزدیکی دارد. توزیع سرعت صوت در اقیانوس به وسیله پدیده های صوتی و چگالی (دما و شوری) مشخص می شود. جبهه ها، پیچک ها و دیگر ویژگی های دینامیکی آب دریا نیز می توانند انتشار سیگنال های صوتی را تحت تأثیر قرار دهند. در این مقاله با استفاده از داده های اندازه گیری شده، که در سال ۲۰۰۳ م و در فصل پاییز در بخش جنوبی دریای خزر (سواحل بابلسر) توسط پژوهشگاه علوم اقیانوس شناسی و جوی اندازه گیری و ثبت شده اند، روند تغییرات فشار اکوستیکی با استفاده از داده های اندازه گیری شده دما و شوری در حالت مستقل از برد (تنها یک نیمرخ سرعت صوت وارد شده است) و در محیط نرم افزار متلب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که با نصب منبع صوتی در عمق ۶ متری از سطح دریا (بالای لایه ترموکلاين)، یک کانال صوتی به دلیل اثر وارونگی ریز دمایی روی نیمرخ سرعت صوت شکل می گیرد. در این حالت، منطقه کور برای عمق های بیشتر از ۳۰ متر و بردهای بالاتر از ۲۷۰۰ متر نیز تشکیل می گردد. همچنین، با قراردادن منبع اکوستیکی در عمق های ۴۰ متری (وسط ترموکلاين) و ۵۲ متری (پایین ترموکلاين) مشاهده شد که پرتوهای صوتی به سمت بستر دریا خمیده و به صورت حرکات زیگزاگ در محیط منتشر می شوند. در این حالت به نواحی بالای منبع صوتی، انرژی صوتی بسیار کمتری نفوذ می کند و سبب تشکیل نقاط کور وسیعی در این مناطق می گردد.

واژگان کلیدی: دریای خزر، لایه ترموکلاين، انتشار صوت، چشمه های اکوستیکی، کانال صوتی

## ۱. مقدمه

برای حل معادله ۲ می‌توان عبارت ۳ را در نظر گرفت:

$$p(X, t) = A(X) e^{jw(t-\tau(X))} \quad (3)$$

در این رابطه  $X = \{x, y, z\}$  نماینده مختصات مورد نظر است. عبارت  $w(t-\tau(X))$  تابع فاز نامیده می‌شود. بنابراین برای هر مقدار زمان داده شده  $t$  رویه حاصل از رابطه  $t - \tau(X) = \text{constant}$  نشان‌دهنده نقاط هم‌فاز برای محیط است، که به این رویه جبهه موج نیز گفته می‌شود. منحنی عمود بر این جبهه موج، پرتو نامیده می‌شود. بنابراین می‌توان مسیر انتشار پرتو را به صورت عبارت پارامتری ۴ نوشت:

$$\sigma(S) = \begin{cases} x = x(s) \\ z = z(x) \\ y = y(x) \end{cases} \quad (4)$$

در این صورت بردار مماس بر مسیر پرتو به صورت زیر خواهد بود.

$$\bar{e}_t = \left(\frac{dx}{ds}\right)\bar{i} + \left(\frac{dy}{ds}\right)\bar{j} + \left(\frac{dz}{ds}\right)\bar{k} \quad (5)$$

همچنین چون  $\bar{e}_t$  عمود بر جبهه موج است، پس داریم:

$$\bar{e}_t = \frac{\nabla \tau}{|\nabla \tau|} \quad (6)$$

با جایگذاری رابطه ۳ در معادله ۲ و جداسازی قسمت‌های حقیقی و موهومی آن داریم:

$$\nabla^2 A - w^2 A \cdot |\nabla t|^2 + \left(\frac{w}{c}\right)^2 = 0 \quad (7)$$

$$2w \nabla A \cdot \nabla \tau + wA \nabla^2 \tau = 0 \quad (8)$$

با در نظر گرفتن فرضیات  $A(x)$  به صورت شدید تابع مکان نباشد و یا برای حالتی که فرکانس بالا باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{1}{w} \rightarrow 0 \quad (9)$$

سپس می‌توان با ساده‌سازی روابط بالا به رابطه *Eiconal* در حالت برداری رسید.

$$\nabla \tau = \frac{1}{c} \bar{e}_t \quad (10)$$

فناوری ارسال سیگنال صوتی از میان لایه‌های مختلف آب در سامانه‌های مخابرات زیر دریا کاربرد فراوانی دارد. سیگنال‌های صوتی وقتی از میان لایه‌های آب عبور می‌کنند، در زمان‌های مختلف دچار تغییراتی روی شکل و فاز می‌شوند. اقیانوس محیطی پویا و متغیر است؛ هر کدام از پدیده‌های اقیانوسی نیز دارای خصوصیات منحصر به فردی هستند. مثلاً پدیده‌هایی چون جریان‌ها، امواج داخلی، جریان‌های نفوذی و تلاطم‌های کوچک مقیاس و ترموکلاين‌های فصلی سبب ایجاد تغییرات روی سیگنال‌های صوتی می‌شوند. تنها ویژگی فیزیکی اقیانوس که بر انتشار امواج صوتی تأثیر می‌گذارد، سرعت صوت است که دارای مقدار عمومی ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در اقیانوس‌های استوایی و معتدل است [۱]. سرعت صوت در اقیانوس تابعی از سه متغیر است: دما، شوری و فشار (یا عمق). این تابع، تابعی افزایشی از هر سه متغیر است. عبارتی ساده و تجربی برای سرعت صوت (متر بر ثانیه)، برگرفته از مطالعه مدوین در سال ۱۹۷۵ م به صورت رابطه ۱ ارائه شده است:

$$c(T, z, S) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.019h \quad (1)$$

در این رابطه  $S$  شوری آب برحسب psu،  $h$  عمق آب برحسب متر و  $T$  دمای آب برحسب درجه سلسیوس است. این معادله در محدوده‌های زیر صحیح می‌باشد [۴]:

$$0 < Z < 1000m$$

$$0 < S < 45 psu$$

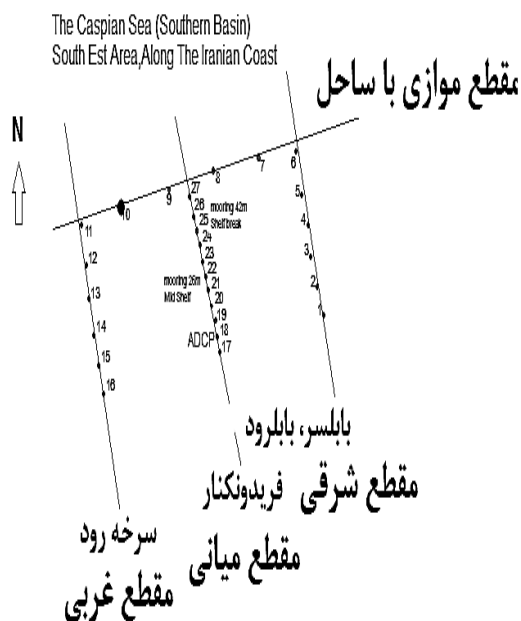
$$0 < T < 35^\circ C$$

## ۲. نظریه روش پرتو

معادله فشار اکوستیکی به کمک معادلات اندازه حرکت و پیوستگی، بعد از تقریب‌هایی به صورت ۲ حاصل می‌شود.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c(x)^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

متر بر ثانیه) و  $h$  عمق دریا (برحسب متر) است. کمترین عمق دریا را می‌توان در محیط و ناحیه مورد بررسی، در متغیر  $h$  جایگذاری کرد. همچنین می‌توان متوسط سرعت صوت را در متغیر  $c$  قرارداد.



شکل ۱. ایستگاه‌های انجام عملیات CTD در منطقه ساحلی بابلرس

کوتاه سخن اینکه می‌توان این روش را برای سونارهای فعال بالاتر از ۲ کیلوهرتز مورد استفاده قرار داد [۶]. بنابراین، برای مثال اگر متوسط سرعت صوت را در دریای خزر ۱۴۷۸ متر بر ثانیه و حداقل عمق دریا در سناریو مورد نظر برابر ۸ متر باشد، برای فرکانس‌های مساوی و یا بالاتر از مقدار آستانه زیر می‌توان از روش پرتو استفاده نمود.

$$f > \frac{10 \times 1487}{8} = 1847.5 \text{ Hz} \quad (12)$$

لذا با توجه به رابطه ۱۲ برای بررسی تغییرات فشار صوتی در فصل پاییز و در ایستگاه مورد نظر، تمام سناریوها در فرکانس ۳۰۰۰ هرتز شبیه‌سازی خواهیم شد.

#### ۴-۱. مشخصات سناریو اجرای مدل پرتو

مشخصات شبیه‌سازی انتشار صوت در ایستگاه مذکور عبارت است از:

بر اساس رابطه ۱۰ در صورت معلوم بودن رابطه سرعت برحسب مکان  $c = c(x)$  می‌توان مسیر انتشار پرتو را تعیین کرد. همچنین، با معلوم بودن  $t$  می‌توان تابع دامنه فشار  $A(x)$  را با استفاده از رابطه ۸ به‌دست آورد [۲].

### ۳. منطقه مورد مطالعه

دریای خزر به‌عنوان بزرگترین حوضه آبی بسته جهان، در داخل قاره آسیا قرار گرفته است. در حال حاضر، سطح این دریا ۲۷ متر پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد و مساحت آن بیش از ۳۹۰۰۰۰ کیلومتر مربع است. سرتاسر قسمت جنوبی آن را خط ساحلی ایران با طول ۹۰۰ کیلومتر پوشش می‌دهد [۳]. منطقه مورد مطالعه از حداقل ۲ کیلومتری شرق رودخانه بابلرود آغاز و به طول ۲۴ کیلومتر در امتداد ساحل دریا به سمت غرب تا سرخه‌رود را در مختصات مابین  $36^{\circ}40'$  شمالی،  $52^{\circ}41'$  شرقی و  $36^{\circ}40'$  شمالی،  $52^{\circ}25'$  شرقی شامل می‌شود. بابلرود در شرق منطقه مورد مطالعه و بندر فریدونکنار در مرکز این منطقه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱). در این مقاله با استفاده از روش پرتو برای ایستگاهی با موقعیت جغرافیایی  $36^{\circ}47'$  شمالی و  $52^{\circ}26'$  شرقی، با استفاده از چشمه‌های صوتی در اعماق مختلف، روند تغییرات فشار اکوستیکی در فصل پاییز و در حالت مستقل از برد (تنها یک نیمرخ سرعت صوت ایستگاه شماره ۱۰ در محاسبه و شبیه‌سازی فشار صوتی وارد شده است) مورد بررسی قرار گرفته شد.

### ۴. معیار انتخاب فرکانس کار

مدلسازی مبتنی بر روش پرتو برای کاربردهای فرکانس متوسط و بالا سازگاری دارد. قانون ساده‌ای که برای کنترل بالا بودن فرکانس می‌تواند استفاده شود، به‌صورت رابطه ۱۱ است:

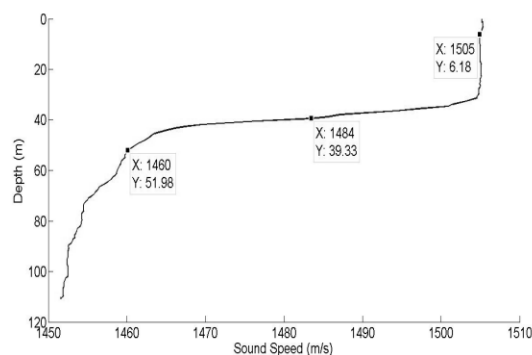
$$f > 10c/h \quad (11)$$

به‌طوری‌که در این رابطه  $f$  بیانگر مقدار فرکانس منبع صوتی (برحسب هرتز)،  $c$  سرعت انتشار صوت (برحسب

شدت توان صوتی بیشتر با رنگ‌های سرخ‌تر و گرم‌نمایش داده شده است. به‌تدریج که در اثر اتلاف انتشار و جذب از شدت انرژی صوتی کاسته می‌شود و از رنگ‌های سرد و متمایل آبی استفاده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، چنانچه چشمه صوتی در عمق ۶ متری (بالای لایه ترموکالین) نصب شود، کانال صوتی در اثر وارونگی ریز دمایی در این عمق ایجاد می‌شود. البته باید توجه داشت که این کانال صوتی در حالت مستقل از برد ایجاد می‌شود و ممکن است در حالت وابسته به برد (چندین نیمرخ سرعت صوت) محو شود. انرژی منتقل شده در این کانال صوتی با ویژگی‌های ذکر شده در این سناریو از شدت نسبتاً زیادی برخوردار است. شدت انرژی صوتی در نزدیکی چشمه و تا عمق ۴۰ متری بیشترین مقدار خود را دارد. با افزایش برد (فاصله از چشمه صوتی) از میزان شدت انرژی به دلیل اتلاف و جذب توسط محیط کاسته می‌شود، به طوری که برای بردهای بالاتر از ۲۷۰۰ متر و عمق‌های بیشتر از ۳۰ متر، میزان شدت این انرژی به حداقل می‌رسد. بنابراین می‌توان گفت که در این محدوده از محیط، انرژی صوتی خیلی کمتری نفوذ می‌کند و منطقه کور تشکیل می‌شود. همچنین، نقاط کور در نزدیکی سطح آب دریا نیز تا عمق ۸ متری و بین برد ۲۸۰۰ تا ۴۰۰۰ متری تشکیل می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، چنانچه منبع در عمق ۴۰ متری (وسط ترموکالین) نصب شده باشد، پرتوهای صوتی به سمت پایین خمیده می‌شوند و در نتیجه بیشتر انرژی صوتی به سمت بستر دریا متمرکز می‌شود. در این حالت، پرتوها به صورت حرکات زیگزآگ در محیط و به سمت جلو انتشار می‌یابند و با افزایش برد از شدت انرژی آنها کاسته می‌شود. همچنین، برای عمق‌های کمتر از ۳۵ متر و تحت ویژگی‌های این سناریو، شدت انرژی صوتی به کمترین مقدار می‌رسد. این امر سبب می‌شود که فضای بزرگی از محیط در بالای چشمه صوتی فاقد انرژی باشد و محدوده کور وسیعی در بالای منبع ایجاد شود.

۱. تغییرات سرعت صوت از سطح تا بستر دریا در ایستگاه اشاره شده (شکل ۲).
۲. فرکانس منبع: ۳۰۰۰ هرتز
۳. عمق منبع: ۶، ۴۰ و ۵۲ متری
۴. نوع منبع: نقطه‌ای
۵. زاویه پرتو برحسب درجه: (۱۰، -۱۰)
۶. تعداد پرتو: ۶۰ پرتو
۷. ویژگی‌های سطح و بستر دریا نیز در این مقاله به صورت خلاصه در نظر گرفته شده است تا سناریو فقط تغییرات محیطی حاصل از تغییرات نیمرخ سرعت صوت را نشان دهد.

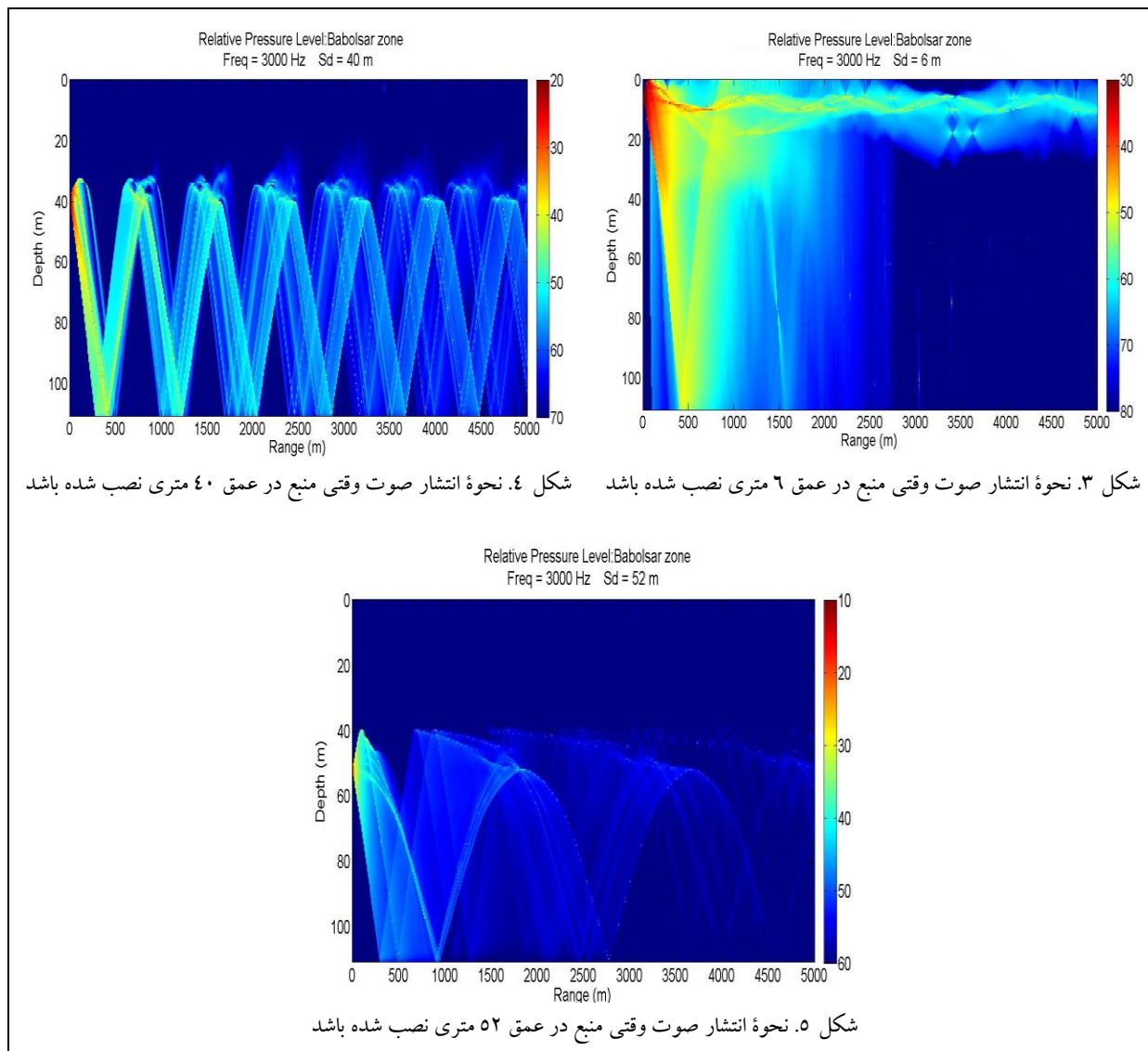


شکل ۲. نیمرخ سرعت صوت در ایستگاه مشخص شده

شکل ۲ نیمرخ تغییرات سرعت صوت را در فصل پاییز و در نقطه مشخص شده با موقعیت جغرافیایی  $26^{\circ}52'$  شرقی و  $36^{\circ}47'$  شمالی نشان می‌دهد. در ضمن محل چشمه‌های صوتی که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این نیمرخ به صورت نقاط سیاه نمایش داده شده است.

## ۵. تجزیه و تحلیل سناریوها

در این مقاله مدل پرتو با استفاده از برنامه متلب اجرا شده است. شکل ۳ میزان توان سیگنال صوتی منتشر شده از منبع صوتی را در تمام محیط مورد بررسی نشان می‌دهد. مقدار شدت انرژی صوتی در هر نقطه از دریا با شدت رنگ نمایش داده شده است. میله رنگی سمت راست شکل‌ها، نشان‌دهنده میزان شدت توان متناظر به هر رنگ است.



شکل ۳. نحوه انتشار صوت وقتی منبع در عمق ۶ متری نصب شده باشد / شکل ۴. نحوه انتشار صوت وقتی منبع در عمق ۴۰ متری نصب شده باشد

شکل ۵. نحوه انتشار صوت وقتی منبع در عمق ۵۲ متری نصب شده باشد

متری (پایین ترموکلاين) نصب شود نشان می‌دهد. در این شکل، مانند شکل ۴، پرتوهای صوتی به سمت پایین خمیده می‌شوند که در نتیجه آن انرژی صوتی نیز به سمت بستر متمایل می‌گردد. نقاط کور مانند شکل ۴، در بالای منبع محدوده وسیعی را پوشش داده است که به عنوان یک وجه مشترک بین این دو شکل به حساب می‌آید. اما تفاوت اساسی شکل‌های ۴ و ۵ در این است که وقتی چشمه صوتی در عمق ۴۰ متری قرار دارد، شدت انرژی صوتی در اعماق پایین‌تر از چشمه بیشتر از زمانی است که چشمه در عمق ۵۲ متری قرار داده می‌شود. انتقال انرژی در راستای افقی با افزایش برد به شدت کاهش یافته است؛ به طوری که

نقاط کور حتی در اعماق پایین منبع نیز به دلیل زاویه پرتوهای بازتابی از بستر و پرتوهای منعکس شده از قسمت زیر لایه ترموکلاين به وجود می‌آیند. مساحت این نقاط کور که در زیر چشمه ایجاد می‌شوند با افزایش برد کاهش می‌یابد. وجود پرتوهای صوت در یک نقطه از محیط آب دریا، سبب ایجاد فشار صوتی در آن نقطه می‌شود. هرچه تجمع پرتوها در محیط بیشتر باشد، آنگاه شدت و در نتیجه فشار صوت نیز در محیط و یا در نقطه ای از آن بالا می‌رود. وجود نقاط کور (تاریک)، به علت نفوذ کم پرتو یا سیگنال صوتی در آن قسمت از محیط می‌باشد. شکل ۵ نحوه انتشار انرژی صوتی را وقتی چشمه در عمق ۵۲

برای بردهای بالاتر از ۳۰۰۰ متر و عمق بیشتر از ۴۰ متر، شدت انرژی صوتی کمترین میزان خود را دارد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از داده‌های اقیانوسی دما و شوری در خزر جنوبی، که در سال ۲۰۰۳ م و در منطقه ساحلی بابلر توسط پژوهشگاه علوم اقیانوس‌شناسی و جوی اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند، روند تغییرات دمای ستون آب برای یک ایستگاه در فصل پاییز بررسی شد. سپس نتایج نشان داد که نیمرخ‌های سرعت صوت کاملاً از نیمرخ‌های دمایی تبعیت می‌کند. نیمرخ‌های دما و سرعت صوت برای ایستگاه مورد بررسی کاملاً شبیه هم بوده، به طوری که از آوردن نیمرخ دما صرف‌نظر شده است. همچنین، عمق لایه ترموکلاين پاییزی، ۳۰ متر و ضخامت آن ۱۵ متر مشخص گردید، به طوری که، این لایه با تغییرات شدید دمایی تا عمق ۴۵ متری دریا کشیده می‌شود. در ادامه برای بررسی سیستم‌های سونار و نقش لایه ترموکلاين در نحوه انتشار

فشار صوتی در این محیط در حالت مستقل از برد (فقط یک نیمرخ سرعت صوت استفاده شده است)، چشمه‌های اکوستیکی در اعماق ۶ متری (بالای ترموکلاين)، ۴۰ متری (وسط ترموکلاين) و ۵۲ متری (پایین ترموکلاين) با فرکانس کاری ۳۰۰۰ هرتز قرار داده شد. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار متلب نشان داد که چنانچه منبع صوتی در عمق ۶ متری نصب شود، کانال صوتی در این عمق به دلیل اثر وارونگی ریز دمایی با قدرت انتقال انرژی صوتی بیشتری به وجود می‌آید و نقاط کور برای بردهای بالاتر از ۲۷۰۰ متر و عمق بیشتر از ۳۰ متر تشکیل می‌گردد. اما وقتی منبع صوتی در اعماق ۴۰ و ۵۲ متری قرار داده شد، مشاهده گردید که کانال صوتی در این عمق از محیط ایجاد نمی‌شود و پرتوهای صوتی به سمت بستر دریا خمیده و به صورت حرکات زیگزاگ در محیط منتشر می‌شوند. همچنین، در این حالت انرژی صوتی کمتری به سطح دریا می‌رسد که سبب ایجاد منطقه کور در بالای چشمه صوتی به شکل وسیع می‌شود.

## ۷. مأخذ

- [۱] اکبری‌نسب، م، "اثر ناهمگونی‌های افقی و قائم بر روی انتشار امواج آکوستیک در دریای عمان (محدوده تنگه هرمز)"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ۱۳۹۱، ص. ۲.
- [۲] جبارزاده، م، بختیاری‌نژاد، ف، "بررسی روش Ray tracing برای انتشار امواج آکوستیکی، با پروفیل‌های مختلف سرعت صوت در دریا"، نهمین همایش صنایع دریایی، ۱۳۸۶، ص. ۳-۴.
- [3] Kosarev, A. N., A. G. Kostianoy, *The Caspian Sea Environment*, Ed. by A.G. Kostianoy, A. N. Kosarev, Springer Verlag, 2005.
- [4] Medwin, H. "Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameter." *J. Acoust. Soc. Amer*, 58, 1975, pp. 1318-19.
- [5] Etter, P. C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*, Taylorand Francis, Group, 2003.