



# Comprehensive Investigation of Effects of Environmental Parameters on Shallow Water Sound Propagation

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Rezaee M.<sup>1\*</sup>,  
Solki E.<sup>2</sup>,  
Nasirbaghban K.<sup>3</sup>,

### How to cite this article

Rezaee M., Solki E., Nasirbaghban K.,  
Comprehensive investigation of  
effects of environmental parameters  
on shallow water sound propagation.  
Modares Mechanical Engineering;  
2024;24(07):467-474.

## ABSTRACT

Due to lower cost compared to field measurement, simulation of sound propagation is considerably favorable for acoustic researchers. One of most optimized methods in this regard is PE (parabolic Equation), which gives detailed low cost results especially in the low and mid frequencies. On the other hand, most of the human interaction with the water bodies are in the so called shallow water region, where PE is the most common method of acoustic simulation. In this study, effects of environmental parameters on transmission loss are investigated in the range of the scale of few tens of kilometers. The results show subsurface flows and sound speed profile variations in the course of the range, have the least effects and bottom properties, specifically the attenuation factor, are the most effective parameter in the low frequency sound propagation. On the other side, in the range of higher frequencies (more than 1000 Hz), seasonal variation of sound speed profile has the most efficient effect.

**Keywords:** Sound Propagation, Transmission Loss, Shallow Water, Sound Speed Profile, Bottom Properties.

## CITATION LINKS

1- Numerical modeling in ocean seismo-acoustics. 2- Underwater acoustic modeling and simulation 3- Computational ocean acoustics. 4- Optimum frequency of propagation in shallow water environments. 5- Acoustics in moving inhomogeneous media .6- Analysis Of Parabolic Equation (Ramgeo) Propagation Model In North Natuna Sea. 7- Underwater sound channel in the northeastern East China Sea. 8- Characteristics of sound propagation in shallow water over an elastic seabed with a thin cap-rock layer 9- Effects of East China Sea shallow-water environment on acoustic propagation. 10- The parabolic approximation method. 11- A parallel 3-D parabolic wave equation solver. 12- Numerical solutions of range-dependent benchmark problems in ocean acoustics. 13- Hydrochemistry and nutrient distribution in southern deep-water basin of the Caspian Sea.

<sup>1</sup>Iran Society of Acoustical Sciences,  
Tehran, Iran.

<sup>2</sup> National Infrasound Laboratory,  
Tehran, Iran

<sup>3</sup>Aerospace Engineering  
Department, Amirkabir University  
of Technology, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Iran Society of Acoustical  
Sciences, Tehran, Iran.

rezaee. Mhrezaiyan@aesir.ir

### Article History

Received: April 21, 2024

Accepted: September 3, 2024

ePublished: November 6, 2024

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

## شبیه‌سازی اثرات عوامل محیطی بر انتشار صدا در محیط آب کم‌عمق با استفاده از مدل انتشار معادله سهموی

محمد رضایی<sup>۱\*</sup>، احسان سلکی<sup>۲</sup>، کبری نصیریان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> انجمن علوم صوتی ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> آزمایشگاه ملی فروصدا، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

شبیه‌سازی عددی انتشار صدا زیر آب به دلیل هزینه بسیار کم در مقابل اندازه‌گیری میدانی در دریا، مورد توجه محققان حوزه صوتیات قرار دارد. یکی از روش‌های بهینه این شاخه، روش معادله سهموی است که نتایجی با دقت و هزینه مناسب در حوزه بسامدهای میانی و پایین‌تر ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، اغلب برهم‌کنش بشر با صوتیات زیرآب در حوزه نزدیک سواحل و طبعاً آب‌های کم‌عمق صورت می‌گیرد که شبیه‌سازی به روش معادله سهموی برای این حوزه بسیار رایج است. این تحقیق، به بررسی اثرات عوامل محیطی بر افت تراپردی در مسافت‌های از مرتبه چند ده کیلومتر می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهند جریان‌های زیرسطحی و تغییرات نیم‌رخ سرعت صدا در جهت برد، تأثیر اندکی بر توزیع افت تراپردی در بسامدهای پایین دارند و خواص بستر به‌ویژه ضریب تنکش آن در این حوزه بسامدی از بیشترین اهمیت برخوردار است. در مقابل، در حوزه بسامدهای بالاتر (مرتبه ۱۰۰۰ هرتز) نیم‌رخ سرعت صدا بیشترین نقش را در تعیین مقدار افت تراپردی ایجاد می‌کند. این مسئله نشان می‌دهد در آب کم‌عمق اهمیت جنس بستر محدود به بسامدهای پایین می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** انتشار صدا زیرآب، آب کم‌عمق، افت تراپردی، نیم‌رخ سرعت صدا، خواص بستر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳

\* نویسنده مسئول: Mhrezaiyan@aesii.ir

### ۱- مقدمه

با توسعه و پیشرفت توان سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، شبیه‌سازی عددی به‌عنوان بخشی از علم آکوستیک زیرآب مطرح شده است که شبیه‌سازی بسیاری از مسائل پیچیده انتشار صدا زیرآب را فراهم می‌سازد. با توجه به این‌که انتشار صدا زیرآب پدیده پیچیده‌ای می‌باشد، روش عددی عمومی برای مدل‌سازی تمامی مسایل انتشار صدا زیرآب وجود ندارد. بنابراین تقریب‌های مختلفی بر محیط انتشار صدا و معادله موج اعمال شده است که منجر به پیدایش طیف وسیعی از روش‌های عددی شده است. هریک از این روش‌ها برای مسائل خاصی قابل‌استفاده می‌باشند؛ هرچند در حالات خاصی با یکدیگر هم‌پوشانی نیز دارند<sup>[1]</sup>. در این موارد دقت حل و زمان محاسباتی مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده در انتخاب نوع روش مدل‌سازی می‌باشند. روش‌های مدل‌سازی انتشار صدا زیرآب شامل روش نظریه‌ی پرتو، مدهای متعامد، معادلات سهموی، انتگرال‌گیری از عدد موج و المان محدود می‌باشند<sup>[2]</sup>.

تقریباً تمامی روش‌های مدل‌سازی صدا، مبتنی بر محاسبه انتشار میدانی از یک منبع به یک دریافت‌کننده دور هستند. جداسازی معادله موج به حل‌های خارج‌شونده و واردشونده منجر به معادله سهموی می‌شود. با صرف‌نظر کردن از موج واردشونده (موج پراکنش شده به عقب)، میدان صدا می‌تواند با استفاده از الگوریتم پیش‌روی گام به گام محاسبه شود. این روش اولین بار توسط تپرت (Tappert) در سال ۱۹۷۷ توسعه داده شد و توسط کالینز (Collins) تکمیل شد. معادله سهموی یک روش گام‌زنی مؤثر و کم‌هزینه است که برای محیط‌های وابسته به برد و نیم‌رخ‌های سرعت صدا با تغییرات غیرپیوسته مناسب می‌باشد. این روش هم در آب کم‌عمق و هم در آب عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صوتیات زیرآب، آب کم‌عمق به مناطق دریایی با عمق کمتر از ۲۰۰ متر گفته می‌شود؛ و برعکس به پهنه‌های آبی با عمق بیش از ۲۰۰ متر، آب عمیق گفته می‌شود.

پارامترهای مؤثر بر افت شدت صدا در انتشار در آب‌های کم‌عمق شامل جنس بستر و هندسه‌ی آن، بسامد منبع صدا و پارامترهای محیطی (به‌عنوان مثال نیم‌رخ سرعت صدا و جریان زیرسطحی) می‌باشند. در آب‌های کم‌عمق معمولاً نیم‌رخ سرعت صدا، انعکاس‌دهنده به پایین یا ثابت است. بنابراین در انتشار صدا برخورد موج با بستر اجتناب‌ناپذیر است. هم‌چنین در آب‌های کم‌عمق با کاهش بسامد منبع، مقدار نفوذ صدا در بستر افزایش یافته و افت تراپردی افزایش می‌یابد<sup>[3]</sup>. برای هر موج بر بسامد قطعی وجود دارد که در بسامدهای کمتر از آن کانال صدا شکل نمی‌گیرد و انرژی موج کاملاً به بستر منتقل می‌شود. مقدار این بسامد عمدتاً وابسته به عمق کانال و جنس بستر است. در بسامدهای کمتر از یک کیلوهرتز افت ناشی از برخورد موج با بستر و در بسامدهای بالا پراکنش موج سهم قابل‌توجهی در افت شدت صدا دارند. مطابق تحقیقات جنسن (Jensen) و همکاران<sup>[4]</sup> بسامد بهینه‌ای در انتشار صدا در آب‌های کم‌عمق وجود دارد که مقدار آن عمدتاً وابسته به عمق آب است. مقدار بسامد بهینه برای عمق‌های کمتر از ۲۰۰ متر، در محدوده‌ی ۵۰ الی ۱۰۰۰ هرتز است. هم‌چنین پارامترهای محیطی هم‌چون امواج داخلی، جبهه‌ها، گردابه‌ها، جریان و امواج جزر و مدی باعث تغییر در دامنه، فاز و مسیر انتشار صدا می‌شوند<sup>[5]</sup>.

آگوستینوس (Agustinus) و همکاران با استفاده از کد RAMGEO اثر تغییرات فصلی و موسمی را بر انتشار پهن‌بند صدای زیرآب از بسامد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز بررسی کردند و دریافتند تأثیرپذیری فصلی الگوی انتشار صدا در بسامد ۱۰۰۰ هرتز بیش از بسامد ۱۰۰ هرتز است<sup>[6]</sup>. سونگ (Song) و همکاران کانال کم‌عمق در شمال دریای شرقی چین را در یک مجموعه آزمایش تجربی و هم‌چنین با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مود نرمال مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند کانال ایجاد شده در نیم‌رخ سرعت صدا در حدود عمق ۴۰ متری منجر به افزایش برد سیگنال صوتی به‌صورت قابل

با این حل معادله (۴) به این صورت تغییر می‌کند:

$$2ik_0\phi_r - \phi_{zz} + k_0^2(n^2 - 1)\phi = 0 \quad (۶)$$

که یک معادله سهموی است. کد for3d حل این معادله سهموی را به صورت زیر در نظر می‌گیرد:

$$u_r = ik_0(-1 + \sqrt{1 + X + Y})u \quad (۷)$$

که در آن  $u$  تابعی از عمق ( $z$ )، سمت ( $\theta$ ) و برد ( $r$ ) و  $k_0$  مقدار ثابت عدد موج مرجع هستند و اپراتورهای دیفرانسیلی  $X$  و  $Y$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$X = n^2(r, \theta, z) - 1 + \frac{1}{k_0^2} \rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (۸)$$

$$Y = \frac{1}{k_0^2 r^2} \rho \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \right)$$

که در آن همچنان  $n$  ضریب شکست و  $\rho$  چگالی آن است. در for3d چگالی می‌تواند یک تابع تکه‌ای خطی از  $z$  و  $\theta$  باشد. با بکارگیری تقریب تیلور یک جواب معادله (۷) بدست می‌آید. با ساده‌سازی در نهایت به الگوریتم قدم‌زنی زیر می‌رسیم که در کد for3d پله به پله در جهت برد حل می‌شود<sup>[11]</sup>:

$$u(r + \Delta r, \theta, z) = e^{-ik_0 \Delta r} e^{ik_0 \Delta r (1 + \frac{1}{2} X - \frac{1}{8} X^2)} e^{ik_0 \Delta r \frac{1}{2} Y} u(r, \theta, z) \quad (۹)$$

### ۳- تعریف مسئله

هدف این تحقیق، کمی‌سازی تأثیر پارامترهای مختلف محیطی بر افت انتقالی صدا می‌باشد. برای این کار از نرم‌افزار متن باز for3d استفاده می‌شود که با استفاده از روش معادله سهموی به حل معادله موج می‌پردازد. یک مسئله پیش‌فرض بر مبنای شرایط معمول منطقه کم عمق در حوالی بندر امیرآباد در سواحل دریای خزر نزدیک بابلسر در نظر گرفته شده است. شکل ۱ این منطقه را نمایش می‌دهد. مطالعات پارامتری بر مبنای تغییر فقط یک پارامتر و فرض ثبات بقیه آن‌ها انجام می‌شود. در شکل ۲ الف نمایی از برخی فرضیات اولیه نشان داده شده است. بستر به صورت تخت در نظر گرفته می‌شود. جنس بستر در زمانی که ذکر نمی‌شود، سیلت (Silt) فرض می‌شود. اما برای بررسی اثر جنس بستر ۶ نوع بستر مختلف (شن، ماسه، ماسه ریز، لای، سیلت، گل، ماسه-گل-رس) در نظر گرفته می‌شوند. برای نیم‌رخ سرعت از توزیع سرعت صدای اندازه‌گیری شده در منطقه مورد بررسی در مهرماه استفاده می‌شود (شکل ۲ ب). اندازه‌گیری توزیع سرعت صدا توسط دستگاه سی‌تی‌دی Wisens CTDS 300 در مهرماه ۱۴۰۰ انجام شده است. عمق کل ۱۲۰ متر و عمق مولد علامت صوتی و عمق حسگر به ترتیب ۴۰ و ۳۰ متر مفروض هستند. هم‌چنین در حالت پیش‌فرض، هیچ‌گونه جریان زیرسطحی در نظر گرفته نمی‌شود.

ملاحظه‌ای شده است<sup>[7]</sup>. دانکن (Duncan) و همکاران اثر جنس بستر در آب کم‌عمق نزدیک سواحل استرالیا را با استفاده از روش شبه‌سازی عددی نرمال مود بررسی کردند و دریافتند در بستر با جنس کالکارنیت (Calcarenite) میزان افت انتقالی در آب کم عمق بسیار بالاتر از انواع دیگر جنس بستر است<sup>[8]</sup>. ابوت (Abott) و همکاران تأثیر تغییرات محیطی را بر انتشار صدا در دریای جنوبی چین را به صورت آماری مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند عدم قطعیت وارد شده از طرف این پارامترها، اگرچه میانگین حدود ۲ دسی‌بل دارند، اما در بسامدهای زیر ۵۰ هرتز به صورت قابل ملاحظه‌ای بیشتر هستند<sup>[9]</sup>.

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای محیطی مختلف (از نیم رخ سرعت صدا تا چگالی بستر) در انتشار صدا در آب‌های کم‌عمق در بسامدهای پایین و میانی و با استفاده از روش معادله سهموی بررسی می‌شود. اعتبارسنجی کد عددی هم با استفاده از حل یک مسأله‌ی بنچمارک و هم در مقایسه با یک داده تجربی انجام شده است. پس از اعتبارسنجی، تأثیر عوامل مختلف بر افت تراپردی در ۱۰ کیلومتری یک منبع بررسی می‌شود. عوامل مورد بررسی عبارت هستند از: جریان زیرسطحی، چگالی بستر، سرعت صدا در بستر، ضریب تنکش در بستر، تغییرات نیم‌رخ سرعت صدا و فصل سال که بر نیم‌رخ سرعت صدا تأثیر می‌گذارد.

### ۲- معادلات حاکم

معادله‌ی هلمهولتز در عمومی‌ترین حالت آن به شکل زیر نوشته می‌شود<sup>[3]</sup>:

$$\nabla^2 \psi + k_0^2(n^2 - 1)\psi = 0 \quad (۱)$$

که در آن  $n$  ضریب شکست محیط و  $k_0$  عدد موج در مولد صدا است. در مختصات استوانه‌ای معادله فوق به این صورت بازنویسی می‌شود:

$$\psi_{rr} + \frac{1}{r} \psi_r + \psi_{zz} + k_0^2(n^2 - 1)\psi = 0 \quad (۲)$$

با استفاده از فرض تپرت (Tappert)<sup>[10]</sup>،  $\psi$  را برای استفاده از روش جداسازی متغیرها به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\psi(r, z) = \phi(r, z)V(r) \quad (۳)$$

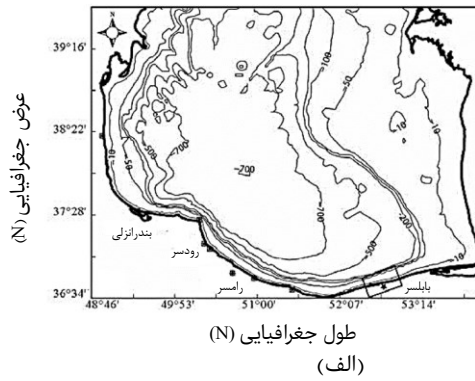
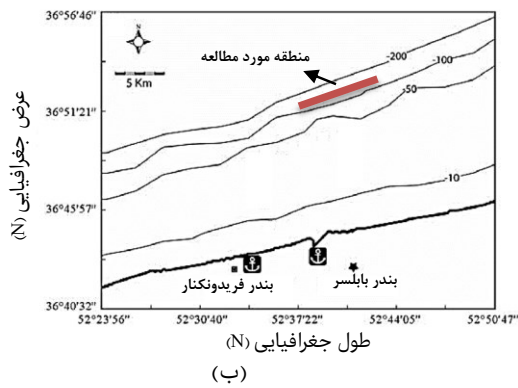
که در آن  $r$  و  $z$  ترتیب فاصله افقی و عمق را نشان می‌دهند و معادله (۲) به معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$\phi_{rr} + \left( \frac{1}{r} + \frac{2}{V} V_r \right) \phi_r + \phi_{zz} + k_0^2(n^2 - 1)\phi = 0 \quad (۴)$$

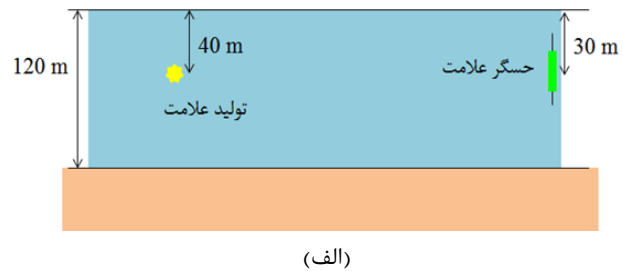
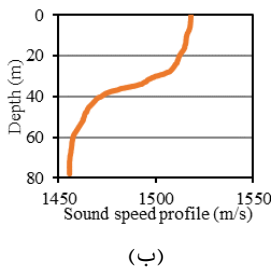
$$V_{rr} + \frac{1}{r} V_r + k_0^2 V = 0$$

معادله دوم (۴) با استفاده از هنکل درجه یکم حل می‌شود که با تقریب عبارتست از:

$$V_{rr} = H_0^1(k_0 r) = \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} e^{i(k_0 r - \frac{\pi}{4})} \quad (۵)$$



شکل ۱) (الف) منطقه جنوب دریای خزر، (ب) محل منطقه مورد مطالعه در این تحقیق.



شکل ۲) (الف) شماتیک مسئله پیش فرض و برخی از فرضیات و (ب) نیمرخ سرعت صدا در منطقه مورد بررسی نزدیک ساحل بابلسر در مهرماه ۱۴۰۰.

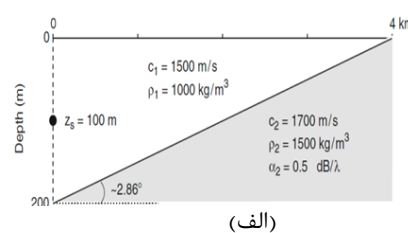
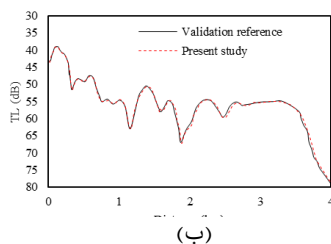
#### ۴-۲- اعتبارسنجی کد عددی با داده تجربی

قابل اعتمادترین روش اعتبارسنجی یک پژوهش شبیه سازی عددی مقایسه آن با داده تجربی است. برای این کار، از اختلاف تراز صدای ثبت شده بین دو نقطه با فاصله متفاوت از یک رخداد یکسان استفاده شد. رخداد مذکور علامت ضربه ای بود که در نزدیکی سواحل جنوبی در دریای خزر انجام شد. یک داده مربوط به فاصله ۱۳/۴ کیلومتری از سیگنال این علامت می باشد و داده دیگر متناظر با فاصله ۱۸/۵ کیلومتری از همان سیگنال است. این آزمایش توسط محققان این پژوهش و در پاییز ۱۴۰۰ انجام شد. اختلاف سطح صدای این دو نقطه با اختلاف متناظر با همین فاصله در شبیه سازی عددی مقایسه می شود. برای جزئیات و مشخصات شبیه سازی از مشخصات محیطی واقعی سواحل جنوبی دریای خزر ( منطقه نمایش داده شده در شکل ۱) استفاده شده است. شکل ۴ نتایج مقایسه با داده تجربی را نمایش می دهد. اختلاف حداکثر ۱۰ دسی بل نشان می دهد که تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی و داده تجربی وجود دارد.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- اعتبارسنجی کد عددی با یک حل عددی معتبر

برای اعتبارسنجی کدهای عددی توسعه داده شده در انتشار صدا زیر آب (for3d)، معمولاً از مسایل بنچمارک استفاده می شود. هندسه محیط انتشار صدا برای اعتبارسنجی کد عددی در شکل ۳ (الف) ارائه شده است. بستر دارای شیب ۲/۸۶ درجه است که از عمق ۲۰۰ متر آغاز شده و تا برد ۴ کیلومتری امتداد یافته است و در نهایت به سطح آزاد می رسد. سرعت صدا در ستون آب ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. سرعت انتشار صدا در بستر ۱۷۰۰ متر بر ثانیه، چگالی بستر ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب تنکش آن نیز برابر ۰/۵ دسی بل بر طول موج است. منبع صدا با بسامد ۲۵ هرتز در عمق ۱۰۰ متری قرارداده شده است [12]. نمودار افت تراپردی برای گیرنده در عمق ۳۰ متری در شکل ۳ (ب) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود تطابق بسیار مناسبی بین نتایج وجود دارد که بیانگر دقت و اعتبار کد عددی می باشد.



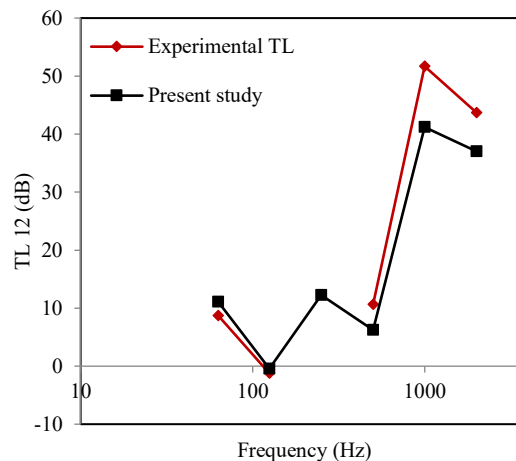
شکل ۳) (الف) هندسه محیط انتشار صدا برای اعتبارسنجی کد عددی [12] و (ب) نمودار افت تراپردی برای گیرنده در عمق ۳۰ متری؛ با استفاده از نرم افزار for3d در مقایسه با پژوهش مرجع اعتبارسنجی.

میانگین، این فرض اثر قابل اغماضی بر افت تراپردی به‌ویژه در بسامدهای پایین دارد. بنابراین در بردهای محدود به ۱۰ کیلومتر، استفاده از نیم‌رخ سرعت یکسان خدش‌های به‌عمومیت مسئله وارد نمی‌کند.

#### ۴-۴- تأثیر جریان‌های زیرسطحی

برای اطمینان از عدم تأثیرپذیری افت تراپردی از جریان‌های زیرسطحی، مقایسه‌ای با استفاده از داده‌های مبتنی بر واقعیت انجام شد. براین اساس، حداکثر نرخ جریان زیرسطحی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۰/۷ متر بر ثانیه و در عمق حدود ۲۰ متری فرض شد (شکل ۶)؛ هم‌چنین فرض شد که این اثر در تمام طول ۱۰ کیلومتر به‌طور ثابت وجود دارد و تغییر نمی‌کند، تا میزان تأثیر آن بزرگنمایی کمی شود. برای آن‌که حداکثر تأثیر این پارامتر ایجاد شود، فرض می‌شود که بالاترین گرادیان را دارد، به‌این معنی که از صفر تا ۲۰ متر مقدار سرعت جریان صفر است و در بیست متر با بالاترین شیب به مقدار مد نظر می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد<sup>[13]</sup>. بنابراین این توزیع به نیم‌رخ سرعت صدا اضافه و کم می‌شود (شکل ۶ الف). در نهایت شکل ۶ ب اثر جریان زیرسطحی را نشان می‌دهد که محدود به ۳ دسی‌بل در بیشترین اختلاف است.

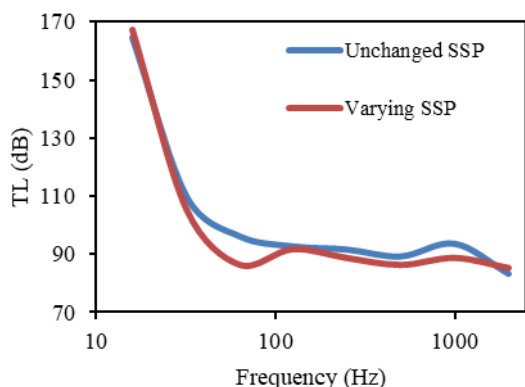
از علایم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علایم و نشانه‌های به‌کاررفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. باید از ارقام فارسی برای نشان دادن اعداد استفاده نمود، مگر آنکه به صورت عمدی در مقاله از چند گروه ارقام استفاده شده و این گروه‌بندی در علایم و نشانه‌ها ذکر شده باشد. اندازه و قلم علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علایم باید دقیقاً یکسان باشد.



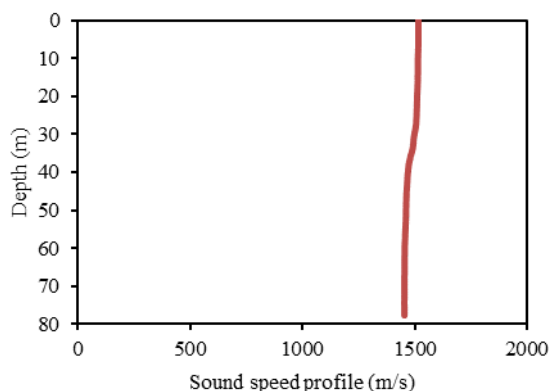
شکل ۴) اعتبارسنجی شبیه‌سازی با داده تجربی؛ مقایسه افت تراپردی بین نقطه ۱ و ۲ در دو حالت داده تجربی و شبیه‌سازی.

#### ۴-۳- تأثیر تغییرات نیم‌رخ سرعت در طول برد

در شرایط واقعی در طی ۱۰ کیلومتر مسافت، نیم‌رخ سرعت صدا کاملاً ثابت و یکسان نیست و تغییرات اندک اما غیرقابل صرف‌نظری دارد. به‌عنوان مثال شکل ۵ الف سه نیم‌رخ سرعت را نشان می‌دهد که در طی یک مسافت ۱۰ کیلومتری در دریای خزر در یک زمان (آبان‌ماه ۱۴۰۰) اندازه‌گیری شده‌اند. در شبیه‌سازی عددی، نیم‌رخ اول در محل منبع تا ۴ کیلومتری فرض می‌شود؛ نیم‌رخ دوم از ۴ کیلومتری تا ۸ کیلومتری؛ نیم‌رخ سوم نیز از ۸ کیلومتر تا ۱۰ کیلومتر. برای بررسی اثر متناظر با فرض ساده‌کننده استفاده از نیم‌رخ یکسان در طول برد، این حالت با شرایط نیم‌رخ سرعت صدای متغیر مقایسه شد. شکل ۵ ب) حاصل این مقایسه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، به‌صورت

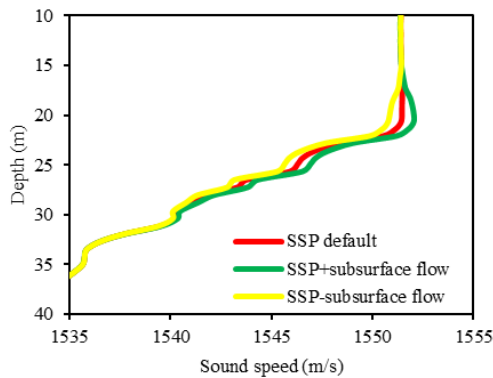


(ب)

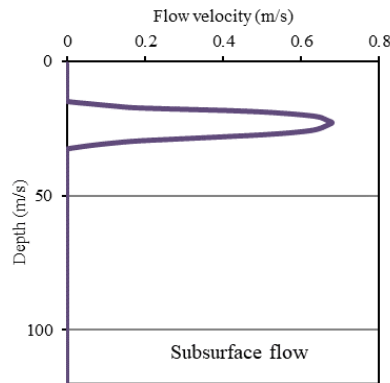


(الف)

شکل ۵) الف) سه نیم‌رخ سرعت که جبهه موج در مسافت ۱۰ کیلومتر با آن‌ها رو در رو می‌شود، ب) بررسی اثر استفاده از نیم‌رخ متغیر به جای نیم‌رخ یکسان در طول برد ۱۰ کیلومتری.



(ب)

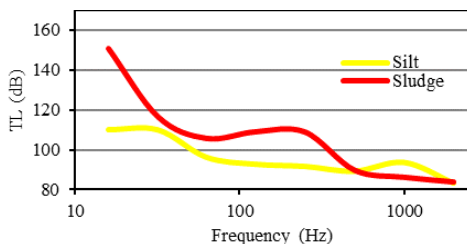


(الف)

شکل ۶) (الف) حداکثر ممکن برای یک جریان زیرسطحی واقعی در شرایط عادی در بخش کم عمق آب های آزاد و (ب) اعمال تغییر جریان زیر سطحی بر نیمرخ سرعت صدا.

ژنس	ژس-گل	گل	سیلت	لای	ماسه ریز	ماسه	شن		
Density (kg/m <sup>3</sup> )	۱۰۰۳	۱/۴۲	۱/۵۸	۱/۷۶	۱/۷۸	۱/۸۶	۱/۹۵	۲/۰۳	
Velocity (m/s)	۱۵۰۰	۱۵۲۰	۱۵۸۰	۱۶۲۳	۱۶۶۴	۱۶۶۸	۱۶۹۷	۱۷۵۳	۱۸۳۶
Attenuation (dB/(mkHz))	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۷۸	۰/۱۱۳	۰/۱۶۷	۰/۱۷۵	۰/۱۵۹	۰/۱۶۷	۰/۱۵۱	۰/۱۴۷

(الف)

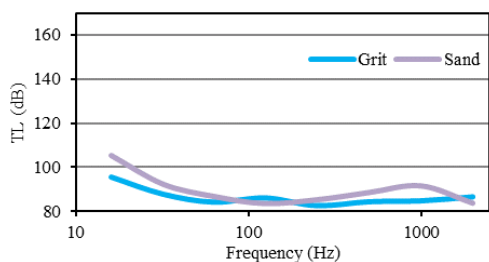


(ب)

شکل ۷) (الف) تغییر چگالی بستر و (ب) اثر آن بر افت تراپردی.

ژنس	ژس-گل	گل	سیلت	لای	ماسه ریز	ماسه	شن		
Density (kg/m <sup>3</sup> )	۱۰۰۳	۱/۴۲	۱/۵۸	۱/۷۶	۱/۷۸	۱/۸۶	۱/۹۵	۲/۰۳	
Velocity (m/s)	۱۵۰۰	۱۵۲۰	۱۵۸۰	۱۶۲۳	۱۶۶۴	۱۶۶۸	۱۶۹۷	۱۷۵۳	۱۸۳۶
Attenuation (dB/(mkHz))	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۷۸	۰/۱۱۳	۰/۱۶۷	۰/۱۷۵	۰/۱۵۹	۰/۱۶۷	۰/۱۵۱	۰/۱۴۷

(الف)



(ب)

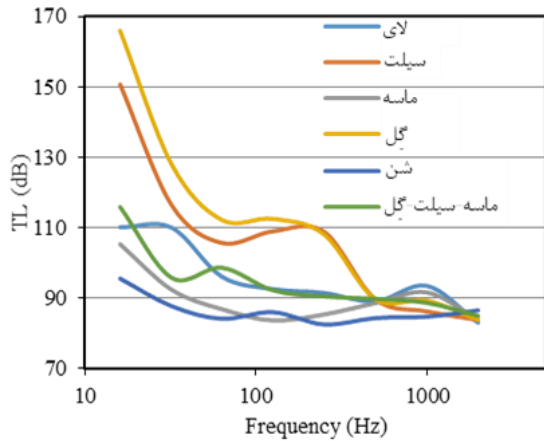
شکل ۸) (الف) تغییر سرعت صدا در بستر و (ب) اثر آن بر افت تراپردی.

#### ۴-۵- تأثیر مشخصات بستر

چگالی بستر، ضریب تنکش و سرعت صدا، سه پارامتر اصلی از مشخصات بستر هستند که تأثیر زیادی بر میزان افت تراپردی به ویژه در بردهای بالا دارند. این موضوع در مناطقی که نیمرخ سرعت ستون آب در آن‌ها با افزایش عمق کاهش می‌یابد، تشدید می‌شود، زیرا برخورد های موج با بستر، متعدد و شبه متعامد خواهند بود. برای کمی سازی پارامتری تأثیر مشخصات بستر، شش نوع از جنس بستر در نظر گرفته می‌شوند. برای بررسی تفکیکی اثرات هر یک از سه پارامتر مؤثر، در سه حالت مختلف، سه زوج از بسترهای فوق انتخاب شد که تنها در یک پارامتر اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارند و در پارامتر دیگر، مقادیر برای هردو نزدیک است. براین اساس برای مطالعه اثر چگالی دو جنس سیلت (Silt) و لای (Sludge)، برای مطالعه اثر سرعت صدا دو جنس ماسه (Sand) و شن (Grit) و برای مطالعه اثر ضریب تنکش، دو جنس گل (Mud) و مخلوط ماسه-گل-ژس (Sand-Mud-Clay) انتخاب شدند. شکل ۷ اثر تغییر چگالی بستر را بر افت تراپردی و تغییرات آن در حوزه بسامد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود اثر قابل توجهی با تغییر بسامد دیده نمی‌شود و تغییرات (فارغ از بسامدهای بسیار پایین) از مرتبه تا ۱۵ دسی بل می‌باشد. شکل ۸ نیز به صورت مشابه با مقایسه شن و ماسه، اثر سرعت صدا را بر افت تراپردی بررسی می‌کند. این شکل نشان می‌دهد اثر سرعت صدا کمتر بوده و محدود به حداکثر ۱۰ دسی بل در تمام حوزه بسامدی می‌باشد.

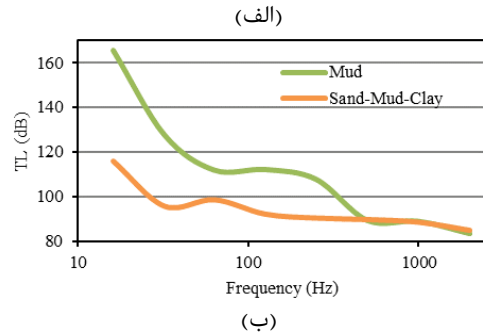
شکل ۹ اثر قابل توجه ضریب تنکش بستر بر افت تراپردی در حوزه بسامدی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، این اثر می‌تواند تا ۵۰ دسی بل بر افت تراپردی اثرگذار باشد؛ هم‌چنین این اثر در بسامدهای پایین مضاعف است و در بسامد بالای ۵۰۰ هرتز بسیار اندک و قابل صرف نظر می‌باشد. در نهایت شکل ۱۰ نمودار تجمیعی افت تراپردی برای جنس‌های مختلف بستر را نشان می‌دهد.

هرتز نشان می‌دهد. رنگ‌ها در جدول ۲ نشان‌دهنده مقادیر هستند. همانطور که در این جدول مشخص است، ضریب تنکش بستر به ویژه در بسامدهای زیر ۲۵۰ هرتز و نیم‌رخ سرعت صدا در بسامدهای بالای ۲۵۰ هرتز از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر افت تراپدی در آب‌های کم عمق هستند.



شکل ۱۰) افت تراپدی در ۱۰ کیلومتر برد، برای انواع مختلف جنس بستر و در بسامدهای مختلف از ۱۶ تا ۲۰۰۰ هرتز.

	آب	زئس گیلی	ماسه-گِل-زئس	گِل	سیلت	لای	ماسه ریز	ماسه	شن
Density (kg/m <sup>3</sup> )	۱۰۰۳	۱/۴۲	۱/۵۸	۱/۷۶	۱/۷۸	۱/۰۸	۱/۸۶	۱/۹۵	۲/۰۳
Velocity (m/s)	۱۵۰۰	۱۵۲۰	۱۵۸۰	۱۶۲۳	۱۶۶۴	۱۶۶۸	۱۶۹۷	۱۷۵۳	۱۸۳۶
Attenuation (dB/(mkHz))	۰/۰۰۰۵	۰/۰۷۸	۰/۱۱۳	۰/۱۶۷	۰/۱۷۵	۰/۱۵۹	۰/۱۶۷	۰/۱۵۱	۰/۴۷



شکل ۹) (الف) تغییر ضریب تنکش بستر و (ب) اثر آن بر افت تراپدی.

مقایسه اثر عوامل مختلف محیطی می‌تواند درباره نقش آن‌ها در میزان افت تراپدی انتشار، اطلاعات مهمی ارائه دهد. با این هدف در جدول ۱ این مقایسه نمایش داده شده است. هم‌چنین، جدول ۲ این مقایسه را برای دو بازه تجمیعی زیر ۲۵۰ هرتز و بالای ۲۵۰

جدول ۱) مقایسه بسامدی تأثیر عوامل مختلف محیطی بر افت تراپدی براساس بسامد.

f (Hz)	SSP range dependence	Subsurface flow	Bottom Density	Bottom Attenuation	Bottom Velocity
۱۶	۲/۴	۰/۳	۴۰/۸	۴۹/۹	۹/۹
۳۲	۴/۳	۰	۶/۶	۳۲/۰	۴/۸
۶۳	۱/۹	۰/۵	۹/۶	۱۳/۳	۲/۹
۱۲۵	۰/۷	۱/۸	۱۶/۴	۲۰	۲/۲
۲۵۰	۲/۶	۲/۳	۱۷/۴	۱۷/۴	۳/۰
۵۰۰	۲/۶	۱/۸	۰/۶	۰/۴	۴/۴
۱۰۰۰	۴/۶	۱/۹	۷/۳	۰/۴	۷/۱
۲۰۰۰	۲/۴	۳/۳	۰/۷	۱/۵	۲/۵

جدول ۲) میانگین بسامدی تأثیرات عوامل مختلف محیطی بر افت تراپدی در دو بازه بسامدی با مقسم ۲۵۰ هرتز.

f (Hz)	SSP range dependence	Subsurface flow	Bottom density	Bottom Attenuation	Bottom Velocity
Below 250 Hz	۲/۳	۰/۷	۱۸/۴	۲۸/۸	۵/۰
Above 250 Hz	۳/۰	۲/۳	۶/۵	۴/۹	۴/۲

بین عواملی از جمله نیم‌رخ سرعت صدا، تغییرات سرعت صدا در مسیر انتشار، جریان‌های زیرسطحی، چگالی بستر، ضریب تنکش بستر و سرعت صدا در بستر، عاملی که در منطقه انتشار صدا

#### ۴- جمع‌بندی

یک تحلیل قیاسی چندجانبه درباره اثرات عوامل محیطی بر انتشار صدا در آب‌های کم عمق ارائه شده است. برای این کار از روش عددی معادله سهموی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند از

The Journal of the Acoustical Society of America. 1990;87(4):1499-510.

13- Saleh A, Hamzhepour A, Mehdinia A, Bastami KD, Mazaheri S. Hydrochemistry and nutrient distribution in southern deep-water basin of the Caspian Sea. Marine pollution bulletin. 2018;127:406-11.

بیشترین تأثیر را بر افت تراپردی دارد ضریب تنکش بستر می‌باشد. این اثر به‌ویژه در بازه بسامدی زیر ۲۵۰ هرتز مشهود است. هم‌چنین، هرچه بسامد بالاتر می‌رود، اثر نیم‌رخ سرعت صدا تشدید می‌شود. از سوی دیگر نتایج نشان دادند جریان زیرسطحی کمترین تأثیر را در بین تمامی عوامل دارد و بدون آسیب به عمومیت مسئله می‌تواند نادیده گرفته شود. هم‌چنین به‌صورت کلی قابل مشاهده است که نقش خواص بستر در بسامدهای بالاتر اندک و در بسامدهای پایین‌تر قابل توجه و اساسی است.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

#### منابع

- Schmidt H. Numerical modeling in ocean seismo-acoustics. In OCEANS 91 Proceedings 1991 (Vol. 1, pp. 84-92). IEEE.
- Etter PC. Underwater acoustic modeling and simulation. CRC press; 2018.
- Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB, Schmidt H, Tolstoy A. Computational ocean acoustics. New York, NY: Springer New York; 2011.
- Jensen FB, Kuperman WA. Optimum frequency of propagation in shallow water environments. The Journal of the Acoustical Society of America. 1983;73(3):813-9.
- D. Wilson and V. Ostashev, Acoustics in moving inhomogeneous media, CRC Press, 2015.
- Agustinus A, Manik HM, Sukoco NB, Muharrom EY, Supriyanto T. Analysis Of Parabolic Equation (Ramego) Propagation Model In North Natuna Sea. Transpublika International Research In Exact Sciences. 2024;3(3):1-0.
- Song H, Cho C, Hodgkiss W, Nam S, Kim SM, Kim BN. Underwater sound channel in the northeastern East China Sea. Ocean Engineering. 2018;147:370-4.
- Duncan AJ, Gavrilov AN, McCauley RD, Parnum IM, Collis JM. Characteristics of sound propagation in shallow water over an elastic seabed with a thin cap-rock layer. The Journal of the Acoustical Society of America. 2013;134(1):207-15.
- Abbot P, Celuzza S, Dyer I, Gomes B, Fulford J, Lynch J. Effects of East China Sea shallow-water environment on acoustic propagation. IEEE journal of oceanic engineering. 2003 (2):192-211.
- Tappert FD. The parabolic approximation method. Wave Propagation and Underwater Acoustics. 1977;70:224.
- Lee D, Resasco DC, Schultz MH, Said F. A parallel 3-D parabolic wave equation solver. Singapore, World Scientific. 1994.
- Jensen FB, Ferla CM. Numerical solutions of range-dependent benchmark problems in ocean acoustics.