

بررسی دو-بعدي تأثیرات سه جنس و هندسه منظم بستر دریا بر انتشار صدا با بسامد پایین در محیط دریایی

سامان کرمانی، پرویز قدیمی*

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

انتشار صدا با بسامد پایین در زیر آب یکی از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی در سال‌های اخیر است. از جمله دلایل اهمیت این موضوع می‌توان به قرارگیری نوفه شناورهای سطحی و زیرسطحی در این گروه از امواج صدا اشاره نمود. برای شناخت رفتار صدا در زیر آب می‌بایست عوامل مؤثر بر آن را بررسی نمود. در مقاله حاضر، به تحلیل عددی تأثیرات هندسه منظم و سه جنس مختلف بستر دریا بر انتشار صدا پرداخته شده است. برای این منظور، معادله سهموی انتشار موج صدا با استفاده از روش تفارق متناهی ضمنی حل شده است. نتایج نشان دادند که افت تراگیل صدا برای بستر سنگ خارا با هندسه مثلثی و نیم‌دایره‌ای، با افزایش مسافت، پلکانی کاهش می‌یابد. اما برای هندسه مستطیلی، افزایش تدریجی خواهد داشت. مقادیر افت تراگیل برای بستر ماسه‌سنگ نیز در سه هندسه یاد شده، با افزایش برد، افزایش پیدا می‌کنند. اما در این حالت میانگین افت تراگیل هندسه نیم‌دایره‌ای، حدود ۴ دسی‌بل کم‌تر است. از طرف دیگر، بستر صلب، ماسه‌سنگ و سنگ خارا برای هندسه مستطیلی تأثیر چشم‌گیری بر افت تراگیل صدا در عمق ۳۰ متری آب ندارند.

کلیدواژه‌ها: انتشار صدا زیر آب، بسامد پایین، هندسه بستر، جنس بستر، معادله سهموی.

۱. مقدمه

و تأثیرات بستر بر رفتار انتشار صدا مطالعه نموده‌اند که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. در سال ۱۹۷۹، مدوین و اسپالدینگ به عنوان پیشگامان تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه، مقیاس کوچکی از یک کوه زیر آب را ساختند [۱]. آن‌ها براساس الگوی ساخته شده، رفتار انتشار صدا را با فرض مکان‌های مختلف فرستنده و گیرنده بررسی کردند. سپس، گاتری و همکاران در یک آزمایش میدانی در شرق نیوزلند، تأثیر تپه‌های دریایی را بر انتشار صدا در مجراهای (کانال‌های) صوتی مطالعه کردند [۲]. در این آزمایش‌ها، سه بسامد ۶۳ هرتز، ۱۲۵ هرتز و ۲۵۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفتند و میزان افت تراگیل صدا برای هر یک از آن‌ها بررسی شد. در همان سال، افسون و ترنر تحقیقات میدانی برای تحلیل انتشار صدا در شمال شرقی اقیانوس آرام را انجام دادند [۳]. در این مطالعات، بسامد چشمه صدای ۲۳۰ هرتز در نظر گرفته شده است تا اثرات ناهمواری‌های بستر بر بازگشت صدا مشخص گردند. پس از یک سال، در ادامه تحقیقات دیگر محققین، موریس و همکاران در یک تحقیق میدانی، پراکندگی صدا را از ناهمواری‌های بستر اقیانوس آرام مورد مطالعه قرار دادند [۴]. هم‌چنین، آن‌ها

عموماً، نوفه‌های منتشر شده از برخی صنایع موجود در دریا، شناورهای سطحی و زیرسطحی دارای بسامد پایینی هستند. در محیط زیر آب، امواج صدا با بسامد پایین دارای طول موج بلندی هستند، در نتیجه می‌توانند مسافت زیادی را طی کنند. به همین علت این گروه از امواج صدا می‌توانند باعث شناسایی شناورها در دوردست و یا آثار مخرب بر محیط‌زیست گردند. اما پیش از آنکه به تحلیل آثار امواج صدا پرداخته شود، ابتدا باید با رفتار انتشار صدا و عوامل مؤثر بر آن آشنا گردید. از عوامل مؤثر بر انتشار صدا در محیط دریا، می‌توان به هندسه و جنس بستر اشاره نمود. از آنجایی که بررسی میدانی و آزمایشگاهی صدا در زیر آب بسیار هزینه‌بر و پیچیده است، بسیاری از محققین به صورت عددی به مطالعه در این زمینه پرداخته‌اند. بر همین اساس، در این مقاله تأثیر هندسه‌ها و جنس‌های مختلف بستر بر رفتار انتشار صدا با بسامد پایین به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهشگران مختلفی بر روی موضوع انتشار صدا در زیر آب

* نویسنده پاسخگو: pghadimi@aut.ac.ir

روش تفارق متناهی^۱، تحلیل‌هایی در زمینه انتشار صدا در حضور یک و دو تپه مخروطی شکل انجام داد. او در پژوهش خود فرض کرد که بستر دریا دارای زیرلایه‌های کشسان (الاستیک) است. برنز برای تحلیل‌های خود، به حل عددی معادلات سهموی کشسان پرداخت [۱۱]. باردلی و همکارش نیز یک برنامه رایانه‌ای سه- بعدی با استفاده از روش تفارق متناهی برای حل معادله موج کشسان ارائه دادند [۱۲]. هدف آن‌ها از ارائه این کد رایانه‌ای، تحلیل پراکندگی صدا از احجام و سطوح ناهمگون موجود در کف دریا بود. آن‌ها هم‌چنین به مقایسه رفتار انتشار صدا در حضور یک ناهمواری و مجموعه‌ای از ناهمواری‌های تصادفی در حالات دو- و سه- بعدی پرداختند. جکسون و همکارش نظریه اختلال^۲ مرتبه اول را برای تحلیل صدای پراکنده شده از بسترهای کشسان نامنظم ارائه دادند. آن‌ها در این تحقیق رابطه‌ای را برای قدرت و دامنه پراکندگی ارائه دادند [۱۳]. البته باید توجه داشت که در این روش، چشمه صدا دارای بسامد بالایی است. در سال ۲۰۰۷، فاوست پراکندگی صدا از بسترهای متقارن در مختصات استوانه‌ای را محاسبه نمود. وی در این تحقیق، روش جمع آثار میدان موج را به کار بست [۱۴]. از جدیدترین تحقیقاتی که در این زمینه صورت پذیرفته‌اند، می‌توان به پژوهش‌هایی که به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ انتشار یافته‌اند اشاره نمود. اشمیت و لو در همایشی، توسعه روش حالت جفت‌شده (کوپل مود) برای حالت سه- بعدی و بستر نامتقارن ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از این روش یک کوه به شکل مخروط را در زیر آب تحلیل کردند [۱۵]. پاناتونی نیز با توسعه یک الگو سه- بعدی، انتشار صدا را در برخورد با ناهمواری بستر به شکل یک استوانه متقارن مورد بررسی قرار داد. الگو وی براساس روش انتگرال‌گیری عدد موج پایه‌گذاری شده بود [۱۶]. کوستا و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از ترکیب روش‌های حل اساسی معادله موج و تابع گرین، به حل مسئله انتشار صدا در آب کم عمق با وجود بستر شیب‌دار پرداختند [۱۷]. علت ترکیب این دو روش ضعف روش حل اساسی معادله موج برای

نواحی سایه صدا را بررسی نمودند. برای این کار، آن‌ها از صدایی با بسامد ۱۰۴ هرتز استفاده کردند. سپس، کوینگز و همکاران با انجام تحقیقات میدانی در اقیانوس اطلس در اطراف منطقه برمودا، به تحقیق در رابطه با تأثیرات نوفه محیطی و مجموعه‌ای از تپه‌های دریایی بر انتشار صدا در دور دست پرداختند [۵]. برای این منظور، بسامدهای چشمه در محدوده ۵۰ هرتز الی ۸۰۰ هرتز فرض گردید. در سال ۲۰۰۵، سیکورا در پروژه کارشناسی ارشد خود، صداهای بازگشتی از تپه‌های دریایی در شمال اقیانوس آرام را مورد بحث و بررسی قرار داد. هم‌چنین، وی روشی را برای تحلیل داده‌های استخراج شده از این آزمایش‌ها، توسعه داد [۶].

از طرف دیگر، برخی دیگر از پژوهشگران به صورت هم‌زمان بر روی تحلیل‌های عددی و تحلیلی انتشار صدا تحقیق نمودند. از تحقیقات ابتدایی در این زمینه می‌توان به کار هریسون در سال ۱۹۷۷ اشاره نمود. او با فرض ثابت بودن سرعت صدا و مسیر پرتو صدای، روش تحلیلی برای بررسی انتشار صدا در نزدیکی تپه‌های دریایی، حوزه آبریز رودخانه‌ها و فرورفتگی‌ها ارائه داد [۷]. پس از آن در سال ۱۹۸۰، ینسن و همکاران سعی کردند با بکارگیری روش معادلات سهموی، پراکندگی و بازگشت صدا را از ناهمواری‌های مخروطی شکل، الگوسازی کنند [۸]. برای اعتبارسنجی نیز، تحقیقات آزمایشگاهی میدانی محققین گذشته را مورد استفاده قرار گرفتند. آن‌ها برای حل عددی معادلات از روش تبدیلات فوریه استفاده کرده بودند. هم‌چنین، در دهه ۸۰، باکینگهام یک الگوی نظری را برای انتشار امواج صدای در زیر آب ارائه نمود. یکی از مفروضات مهم او، فرض برگشت‌پذیری کامل سطوح مرزی است. در این پژوهش نیز، تحلیل صدا در اطراف یک کوه مخروطی شکل انجام پذیرفته است. معادلات نظری وی براساس معادلات هلمهولتز پایه‌گذاری شده بودند [۹]. سپس، تولستوی یک روش ترکیبی برای محاسبه انکسار صدا پس از برخورد با موانع توسعه داد [۱۰]. این روش بر پایه حل دقیق و صریح، بنیان گذاشته شده است. هم‌چنین، براساس ادعای نویسنده این روش دارای دقت مطلوبی برای انتشار صدا در محیط دریا است. با شروع دهه ۹۰ و پیشرفت الگوهای رایانه‌ای، برنز با استفاده از

¹ Finite difference

² Perturbation

انجام شده بین روش‌های مختلف در مرجع [۲۲]، نشان داده شده است که این روش برای مسائلی با بسامد پایین و وابسته به برد مناسب می‌باشد. معادله سهموی موج از معادله هلمهولتز در مختصات استوانه‌ای حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} = ik \cdot \left(\sqrt{n^2 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} - 1 \right) \phi(r, z) \quad (1)$$

در این رابطه، ϕ یک متغیر انتقالی است که فشار صدا بر پایه آن تعریف می‌گردد.

$$p(r, z) = \phi(r, z) H_0^{(1)}(k \cdot r) \quad (2)$$

در معادله فشار صدا، $H_0^{(1)}$ نشان دهنده تابع هنکل می‌باشد. هم‌چنین در این معادلات، n شاخص انکسار، k عدد موج و i نماد اعداد موهومی هستند. شاخص انکسار را می‌توان از معادله ۳ محاسبه نمود:

$$n^2 = \left(\frac{c_0}{c} \right)^2 \left[1 + i \frac{\alpha}{2\gamma/\gamma_0} \right] \quad (3)$$

در معادله ذکر شده، c بیانگر سرعت صدا، c_0 سرعت صدا در محل قرارگیری چشمه صدای و α ضریب میرایی صدا می‌باشند. برای ساده‌سازی معادله ۱، عبارت زیر رادیکال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sqrt{n^2 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} = \sqrt{1+q}, \quad q = n^2 - 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4)$$

برای تخمین عبارت زیر رادیکال، روابط مختلفی ارائه شده‌اند. در این مقاله، از تخمین کلاریوت استفاده شده که در معادله ۵ ارائه گردیده است.

$$\sqrt{1+q} = \frac{1 + 0.75q}{1 + 0.25q} \quad (5)$$

شکل نهایی معادله سهموی با جای‌گذاری روابط در معادله ۱ بدست می‌آید.

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = ik \cdot \left(\frac{1 + 0.75 \left(n^2 - 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)}{1 + 0.25 \left(n^2 - 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)} - 1 \right) \phi \quad (6)$$

برای حل معادله سهموی، می‌بایست شرایط اولیه را براساس چشمه صدا تعیین نمود. در این زمینه، روابط تحلیلی مختلفی برای چشمه صدا ارائه شده‌اند. در پژوهش

بسترهای شیب‌دار بود. در همان سال، آرگو در رساله دکتری خود، آزمایش‌های وسیعی را بر روی سرعت صدا و ضریب میرایی رسوبات در بسامدهای بالا و پایین انجام داد [۱۸]. فرانک و همکاران در سال ۲۰۱۳ با بکارگیری معادلات سهموی کشسان، صدای ناشی از منابع زلزله‌های زیر آب را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، آن‌ها دو الگوی عددی برای چشمه صدا در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان دادند که ترکیب چشمه‌های صدا، تخمین مناسب‌تری را از انتشار صدای حاصل از زمین‌لرزه در زیر آب بدست می‌دهد [۱۹]. دونکن و همکاران نیز در همان سال با استفاده از روش انتگرال‌گیری عدد موج، میزان افت تراگیل صدا را بر روی پوسته بین‌قاره‌ای استرالیا تحلیل نمودند [۲۰]. اما، از جمله جدیدترین تحقیقات عددی می‌توان به مقاله بالارد و همکاران اشاره نمود. در پژوهش آن‌ها، انتشار صدا در اطراف یک تپه کسینوسی شکل با استفاده از ترکیب دو رویکرد معادلات سهموی و حالت هنجار (مود نرمال)، تحلیل شده است [۲۱].

در این بخش، سعی شد برخی از مهم‌ترین مطالعات آزمایشگاهی و عددی محققین در زمینه تأثیرات بستر بر انتشار صدا مورد بررسی قرار گیرند. پر واضح است که در اغلب کارها، به مطالعه حول کوه‌های مخروطی شکل پرداخته شده است. اکنون، در این مقاله به بررسی تأثیرات سه هندسه مثلثی، مستطیلی و نیم‌دایره‌ای بستر بر انتشار صدا با بسامد پایین پرداخته خواهد شد. برای بررسی تأثیرات جنس بستر نیز سه حالت کاملاً صلب (برگشت‌دهنده کامل صدا)، سنگ خارا و ماسه‌سنگ انتخاب شده‌اند. برای رسیدن به این هدف، روش معادلات سهموی به کار گرفته شده است، که در بخش معادلات حاکم، تشریح خواهد شد. هم‌چنین، برای حل عددی معادلات در این پژوهش، یک برنامه رایانه‌ای به زبان پایتون نوشته شده است. این برنامه براساس الگوریتمی که در بخش ۳ تشریح خواهد شد، معادلات را حل می‌نماید.

۲. مواد و روش

۲-۱. معادلات حاکم

برای الگوسازی عددی انتشار صدا در زیر آب روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. از جمله این رویکردها می‌توان به روش معادلات سهموی اشاره نمود. براساس مقایسه‌های

با استفاده از تخمین کرنک- نیکلسون می توان معادله ۶ را به شکل معادله ۹ بازنویسی نمود.

$$\frac{\phi^{n_c+1} - \phi^{n_c}}{\Delta r} = ik \cdot \left(\frac{1 + 0.75 \left(n^{\gamma-1} + \frac{1}{k^{\gamma}} \frac{\partial^{\gamma}}{\partial z^{\gamma}} \right)}{1 + 0.25 \left(n^{\gamma-1} + \frac{1}{k^{\gamma}} \frac{\partial^{\gamma}}{\partial z^{\gamma}} \right)} \right)^{-1} \frac{\phi^{n_c+1} + \phi^{n_c}}{2} \quad (9)$$

در رابطه ۹، Δr بیان کننده فاصله افقی نقاط و n_c نیز نشان دهنده شماره ستون نقاط می باشند. به صورت کلی در این روش، دامنه محاسباتی به صورت ستون به ستون حل می گردد. به عبارت دیگر هر ستون، شرط اولیه حل، برای ستون بعد از خود می باشد. با فرض رابطه تفارق مرکزی برای مشتق دوم در راستای عمودی، می توان دستگاه معادلات سه قطری را برای هر ستون از دامنه محاسباتی تشکیل داد:

$$\begin{bmatrix} 1 & Y & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{n_r-1}^{n_c+1} \\ \phi_{n_r}^{n_c+1} \\ \phi_{n_r+1}^{n_c+1} \end{bmatrix} = \frac{W}{W^*} \begin{bmatrix} 1 & \hat{Y} & \hat{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{n_r-1}^{n_c} \\ \phi_{n_r}^{n_c} \\ \phi_{n_r+1}^{n_c} \end{bmatrix} \quad (10)$$

در دستگاه معادلات تشکیل شده، پارامترها به شکل زیر تعریف می شوند:

$$Y = k^{\gamma} (\Delta z)^{\gamma} \left[\frac{1}{W^*} + n^{\gamma-2} \right] - 2$$

$$\hat{Y} = k^{\gamma} (\Delta z)^{\gamma} \left[\frac{1}{W} + n^{\gamma-2} \right] - 2 \quad (11)$$

$$W = 0.25 + \frac{ik \cdot \Delta r}{4}, \quad W^* = 0.25 - \frac{ik \cdot \Delta r}{4}$$

$F=1$

در روابط ۱۰ و ۱۱، n_r مشخص کننده تعداد سطر نقاط دامنه و Δz فاصله عمودی نقاط دامنه هستند. نهایتاً، پس از تشکیل دستگاه معادلات سه- قطری، می بایست به حل آن پرداخت. در این پژوهش، معادلات ماتریسی با استفاده از روش تجزیه LU حل گردیده اند.

برای در نظر گرفتن مرزها، می بایست شرایط مرزی سرعت و فشار ارضاء شوند. بر این اساس، معادلات شرایط مرزی در مرز بین دو محیط ۱ و ۲ عبارتند از:

$$\phi_1(r,z) = \phi_2(r,z) \quad (12)$$

حاضر، معادله گرین برای چشمه صدا مورد استفاده قرار گرفته است که رابطه آن، در عبارت زیر قابل مشاهده می باشد.

$$\phi(\cdot, z) = \sqrt{k} \cdot \left[\frac{1}{4467} - 0.14201 k^{\gamma} (z-z_s)^{\gamma} \right] e^{\frac{k^{\gamma} (z-z_s)^{\gamma}}{2\gamma-512}} \quad (7)$$

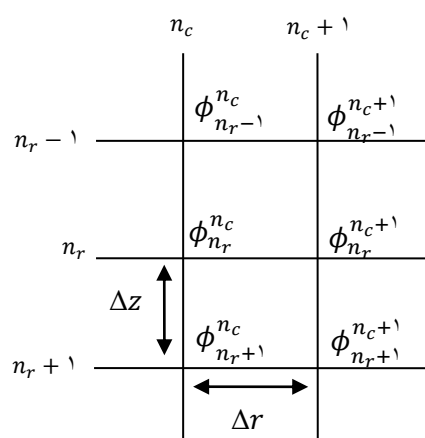
در معادله ۷، z_s مشخص کننده عمق چشمه می باشد. پس از محاسبه ϕ ، می توان متغیر افت تراکسیل صدا را در دامنه محاسباتی، از رابطه ۸ محاسبه نمود.

$$TL = -20 \cdot \log \left(\frac{|\phi|}{\sqrt{r}} \right) \quad (8)$$

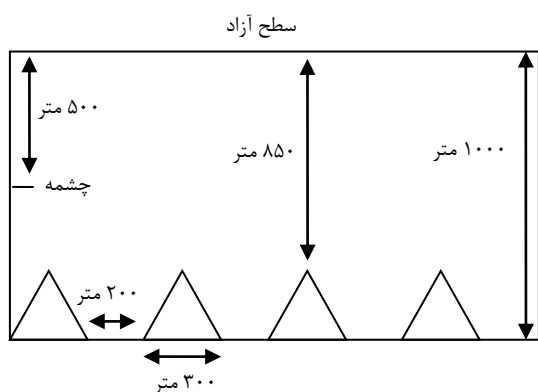
در این بخش، معادلات حاکم بر روش معادلات سهموی به صورت کامل بیان گردیدند. در بخش بعد روند حل عددی آن تشریح خواهد شد.

۲-۲. روش عددی حل معادلات

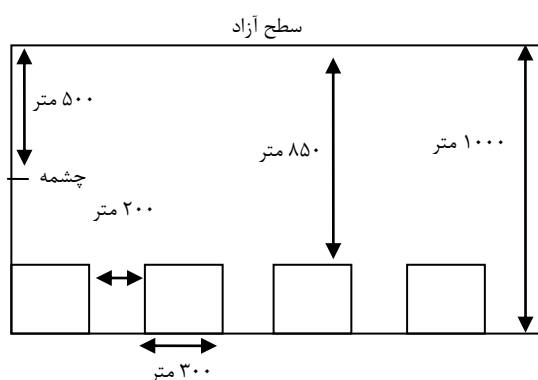
برای حل عددی معادله سهموی موج، دو رویکرد عمومی وجود دارند. در روش اول، با استفاده از تبدیلات فوریه به حل معادله پرداخته می شود و در روش دوم، براساس شیوه تفارق متناهی ضمنی، گسسته سازی معادله مذکور انجام خواهد گرفت. با توجه به اینکه الگوسازی انتشار صدا در زوایای وسیع، در این مقاله مد نظر است، در نتیجه، روش تفارق متناهی ضمنی مورد استفاده قرار می گیرد. در روش تفارق متناهی ضمنی، دامنه محاسباتی به مجموعه ای از نقاط تقسیم می شود. نمونه ای از شبکه محاسباتی در شکل ۱ نشان داده شده است.



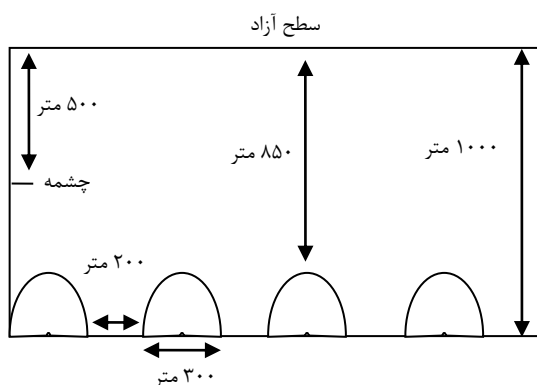
شکل ۱ بخشی از شبکه محاسباتی.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ نحوه استقرار ناهمواری‌های فرض شده با هندسه‌های متفاوت: (الف) مثلثی، (ب) مستطیلی، (ج) نیم‌دایره‌ای.

نهایتاً، در هر یک از حالات، نمودارهای افت تراکم صدا در عمق ۳۰ متر در برد ۲ کیلومتر، رسم شده‌اند.

۴-۲. اعتبارسنجی

پیش از پرداختن به بررسی تأثیرات هندسه و جنس بستر دریا بر انتشار صدا، می‌بایست روند حل عددی را

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \quad (13)$$

با فرض شرایط مرزی ذکر شده، متغیرهای F ، Y و \hat{Y} در دستگاه معادلات به صورت زیر تعریف خواهند شد.

$$Y = \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_2} \left[\frac{k_z^2 (\Delta z)^2}{2w^*} - 1 \right] + \frac{k_z^2 (\Delta z)^2}{2} \left[(n_1^2 - 1) + \frac{\rho_1}{\rho_2} (n_2^2 - 1) \right]$$

$$\hat{Y} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_2} \left[\frac{k_z^2 (\Delta z)^2}{2w} - 1 \right] + \frac{k_z^2 (\Delta z)^2}{2} \left[(n_1^2 - 1) + \frac{\rho_1}{\rho_2} (n_2^2 - 1) \right] \quad (14)$$

$$F = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

در نتیجه، می‌توان بسترهای مختلف را با داشتن چگالی و محاسبه شاخص انکسار الگوسازی نمود. در بخش بعد، تعریف مسئله مورد تحلیل در مقاله بیان خواهد شد.

۳-۲. تعریف مسئله

برای بررسی اثرات هندسه بستر دریا بر انتشار صدا، عمق آب ۱۰۰۰ متر فرض گردید. هم‌چنین، سه هندسه مثلثی، مستطیلی و نیم‌دایره‌ای به ارتفاع ۱۵۰ متر برای مسئله در نظر گرفته شدند. ترتیب قرارگیری هر یک از این ناهمواری‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

از طرف دیگر، چشمه صدا با بسامد ۲۰۰ هرتز، در عمق ۵۰۰ متری در نظر گرفته شده است. برای سرعت صدا در آب نیز از رابطه مانک استفاده شده که معادله آن به شکل زیر می‌باشد.

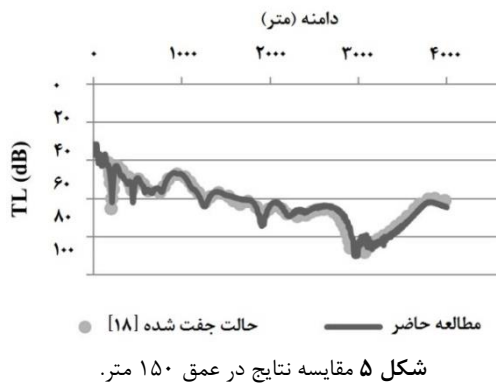
$$c = 1500 \left(1 + 0.00737 \left(\frac{z-500}{250} - 1 + e^{\frac{z-500}{250}} \right) \right) \quad (15)$$

در حالی که، Z عمق نقاط دامنه محاسباتی است. برای تحلیل تأثیر جنس بستر نیز، سه حالت صلب (کاملاً برگشت‌دهنده صدا) سنگ خارا و ماسه‌سنگ فرض شده است. مشخصات سرعت صدا و چگالی سنگ خارا و ماسه‌سنگ در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی سنگ خارا و ماسه‌سنگ.

جنس	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$c \left(\frac{m}{s} \right)$
سنگ خارا	۲۷۰۰	۵۹۰۰
ماسه‌سنگ	۲۰۰۰	۳۵۰۰

روش برای الگوسازی انتشار صدا در محیط ناهمگن دریایی اعتماد نمود.

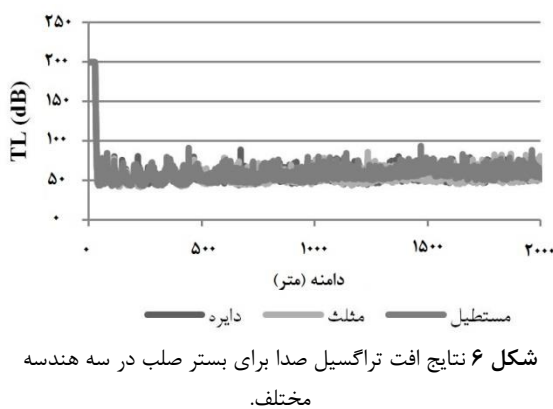


۳. نتایج

برای بررسی بهتر رفتار انتشار صدا، نتایج در دو بخش ارائه شده‌اند که متشکل از تأثیرات هندسه بستر و جنس بستر بر انتشار صدا، می‌باشند.

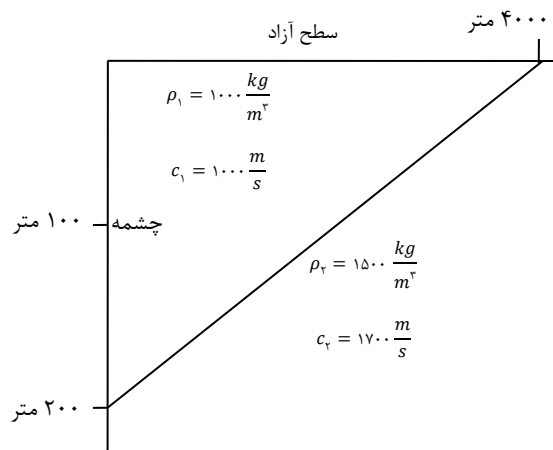
۳-۱. تأثیرات هندسه بستر

همان‌گونه که در بخش مربوط به تعریف مسئله مطرح گردید، نتایج افت تراگسیل صدا در عمق ۳۰ متری استخراج شده‌اند. نمودار شکل ۶، افت تراگسیل صدا را برای بستر صلب در سه هندسه مختلف نشان می‌دهد.

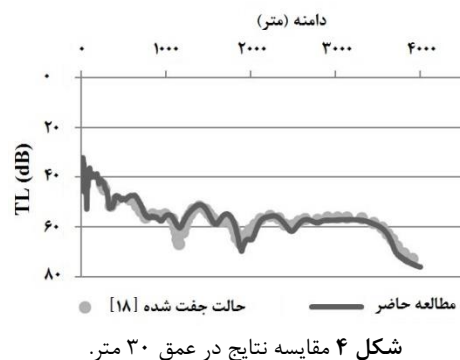


همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، الگوی نوسانات افت، برای سه هندسه مشابه یکدیگر است، لیکن از لحاظ میانگین مقادیر، بستر مستطیلی، حدوداً ۲ دسی‌بل افت بیشتری دارد. نتایج افت تراگسیل برای جنس بستر سنگ خارا، در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشند.

اعتبارسنجی نمود. برای این منظور، انتشار صدا در یک محیط ناهمگن که در شکل ۲ نشان داده شده است، مورد بررسی قرار گرفت. در این مسئله بسامد چشمه صدا ۲۵ هرتز می‌باشد و چشمه در عمق ۱۰۰ متری قرار گرفته است. هم‌چنین، طول دامنه ۴۰۰۰ متر و بستر نیز به صورت گوه‌ای شکل فرض شده‌اند. مشخصات فیزیکی آب و بستر در شکل ۳ مشخص شده‌اند.



برای بررسی میزان دقت حل عددی، نمودارهای افت تراگسیل صدا در دو عمق ۳۰ و ۱۵۰ متر استخراج گردیدند (شکل‌های ۴ و ۵) و با نتایج روش حالت جفت‌شده (کوپل‌مود) [۲۳] مقایسه شدند. در این تحلیل، فاصله افقی نقاط ۵ متر و فاصله عمودی ۰/۵ متر در نظر گرفته شده‌اند.

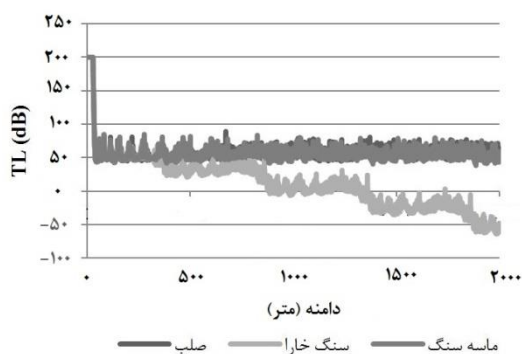


با مقایسه نتایج حاصل از مطالعه حاضر و حالت جفت‌شده [۲۳]، مشخص گردید که میانگین درصد خطا در حدود ۳ درصد می‌باشد. در نتیجه می‌توان به نتایج حاصل از این

می‌کنند. از لحاظ میانگین مقادیر نیز، هندسه‌های مثلثی و مستطیلی تفاوت چندانی ندارند. اما، هندسه نیم‌دایره‌ای حدوداً ۴ دسی‌بل افت کم‌تری دارد. علت این موضوع می‌تواند سطح منحنی نیم‌دایره نسبت به دو هندسه دیگر باشد که باعث افت کم‌تری در مسیر انتشار صدا می‌گردد.

۳-۲- تأثیرات جنس بستر

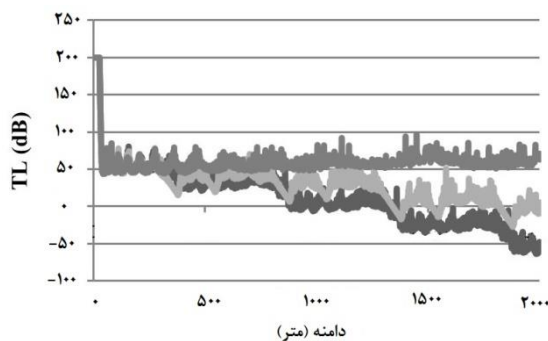
در زیربخش قبل، بررسی تأثیر هندسه بستر بر انتشار صدا ارائه شد. حالا، تأثیر جنس بستر در هر یک از هندسه‌های مورد مطالعه تحلیل خواهد شد. در شکل ۹ تأثیر جنس‌های مختلف بر افت تراگیسیل در هندسه نیم‌دایره‌ای مشخص شده است.



شکل ۹ نتایج افت تراگیسیل صدا برای هندسه نیم‌دایره در سه جنس مختلف.

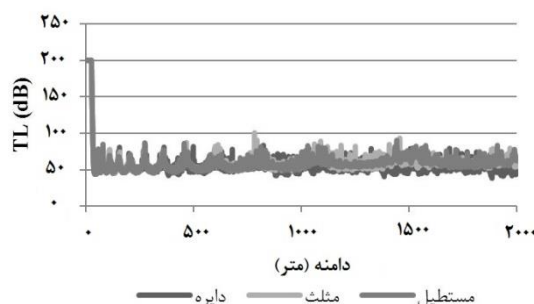
براساس این نمودار، رفتار صدا برای جنس صلب و ماسه‌سنگ مشابه یکدیگر است و از لحاظ میانگین نیز تفاوتی ندارند. اما برای حالتی که جنس بستر سنگ خارا است، کاهش پلکانی افت تراگیسیل کاملاً مشهود می‌باشد. هر یک از این کاهش‌های پلکانی در محدوده حضور ناهماری‌ها در بستر اتفاق افتاده است. نتایج افت تراگیسیل برای هندسه مثلثی در جنس‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، افت تراگیسیل، روند مشابهی را برای جنس‌های صلب و ماسه‌سنگ طی می‌کند. اما، با افزایش مسافت، نوسانات انتشار صدا برای جنس ماسه‌سنگ کاهش می‌یابند. هم‌چنین میانگین افت تراگیسیل حدود ۳ دسی‌بل برای جنس ماسه‌سنگ بیش‌تر از حالت بستر صلب است. برای بستری با جنس سنگ



شکل ۷ نتایج افت تراگیسیل صدا برای بستر سنگ خارا در سه هندسه مختلف.

همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، برای هندسه‌های مثلثی و دایره‌ای افت تراگیسیل به صورت پلکانی کاهش پیدا می‌کند، اما برای هندسه مستطیلی این متغیر افزایش پیدا می‌کند. در هندسه دایره‌ای، در هر مرحله حدوداً ۲۷ دسی‌بل کاهش رخ می‌دهد. اما در هندسه مثلثی در مرحله اول حدود ۱۰ دسی‌بل و در مرحله دوم تقریباً ۲۰ دسی‌بل کاهش افت تراگیسیل مشاهده می‌گردد. حضور هر یک از این کاهش‌های پلکانی حاکی از حضور ناهماری‌ها در بستر است. در هندسه مستطیلی افزایش افت تراگیسیل به صورت تدریجی می‌باشد و نهایتاً حدود ۱۰ دسی‌بل افزایش پیدا می‌کند. نمودارهای افت تراگیسیل برای جنس ماسه‌سنگ در شکل ۸ ارائه گردیده‌اند.



شکل ۸ نتایج افت تراگیسیل صدا برای بستر سنگ ماسه‌سنگ در سه هندسه مختلف.

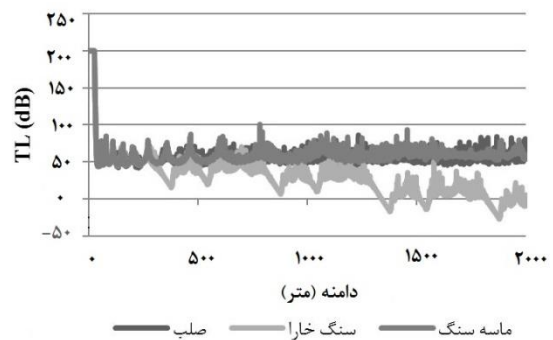
با توجه به شکل ۸، روند مشابه و رو به افزایشی برای هر سه هندسه مشاهده می‌گردد. اما نوسانات به ترتیب از هندسه‌های نیم‌دایره، مثلثی و مستطیلی کاهش پیدا

اشاره کرد. در نتیجه می‌بایست شناخت کافی از رفتار انتشار صدا و عوامل مؤثر بر آن پیدا نمود. بر همین اساس، در این مقاله به بررسی عددی تأثیرات جنس و هندسه‌های مختلف بستر دریا بر انتشار صدا پرداخته شد. برای رسیدن به این هدف، معادله سهموی انتشار صدا با استفاده از روش تفارق متناهی ضمنی حل گردید. مقایسه جواب‌های روش عددی حاضر و نتایج روش حالت جفت‌شده برای یک محیط ناهمگن نشان داد که این روند دارای دقت مناسبی جهت الگوسازی انتشار صدا با بسامد پایین می‌باشد.

نتایج افت تراگسیل صدا در عمق ۳۰ متری زیر آب مشخص نمود که هندسه‌های مختلف برای بستر صلب تفاوت چشم‌گیری با یکدیگر ندارند. اما نمودارهای افت تراگسیل صدا برای بستری با جنس سنگ خارا، کاهش پلکانی را برای هندسه‌های نیم‌دایره‌ای و مثلثی با افزایش مسافت، نشان دادند. در حالی که، برای هندسه مستطیلی، این روند به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. در نتیجه اگر بستر دارای جنس سنگ خارا باشد و ناهمواری‌ها مانند هندسه نیم‌دایره و مثلث دارای یک قله باشند، افت تراگسیل به تدریج کاهش می‌یابد. ولی، برای بستری با هندسه مستطیل شکل که دارای سطح صافی است، افت تراگسیل افزایش می‌یابد. اما در صورتی که جنس بستر ماسه‌سنگ باشد، هندسه‌های ذکر شده تأثیر چشم‌گیری بر رفتار انتشار صدا نمی‌گذارند.

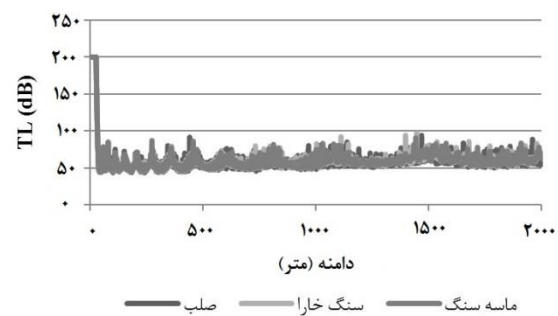
از طرفی دیگر، با مقایسه جنس‌های مختلف بستر برای هر هندسه، مشخص گردید که رفتار صدا در هندسه نیم‌دایره برای بستر صلب و ماسه‌سنگ، مشابه یکدیگر است. ولی، افت تراگسیل برای بستری با جنس سنگ خارا، دچار کاهش‌های پلکانی می‌گردد. برای هندسه مثلثی نیز، جنس بستر صلب و ماسه‌سنگ روند مشابهی را طی می‌کند، اما با افزایش مسافت، نوسانات افت تراگسیل در بستر ماسه‌سنگ کاهش پیدا می‌کنند. نمودار افت تراگسیل برای هندسه مثلثی در بستر سنگ خارا دارای کاهش پلکانی است. اما باید به این نکته توجه نمود زمانی که جنس بستر سنگ خارا است، نوسانات مقادیر افت تراگسیل در هندسه مثلثی شکل، بسیار بیش‌تر از هندسه نیم‌دایره‌ای می‌باشند. در نتیجه هر مقدار قله

خارا، کاهش‌های تکرار شونده افت تراگسیل مانند هندسه دایره‌ای شکل دیده می‌شوند.



شکل ۱۰ نتایج افت تراگسیل صدا برای هندسه مثلثی در سه جنس مختلف.

شکل ۱۱ ارائه دهنده تأثیر جنس‌های مختلف بر افت تراگسیل در هندسه مستطیلی شکل می‌باشد.



شکل ۱۱ نتایج افت تراگسیل صدا برای هندسه مستطیلی در سه جنس مختلف.

براساس شکل ۱۱، جنس بستر تأثیر چندانی بر روند تغییرات افت تراگسیل در هندسه مستطیلی ندارد. علاوه بر این، میانگین مقادیر نیز تفاوت چشم‌گیری با یکدیگر ندارند. جنس‌های مختلف در این هندسه، تنها در بیشینه‌های محلی تفاوت جزئی از خود به نمایش گذاشته‌اند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

امواج صدای با بسامد پایین در زیر آب، به علت طی نمودن مسافت زیاد، دارای اهمیت فراوانی هستند. از جمله مهم‌ترین علل اهمیت آن‌ها، می‌توان به آلودگی صدای محیط‌زیست و شناسایی شناورهای سطحی و زیرسطحی

- Acoustical Society of America, vol. 68, pp. S52, 1980.
- [9] M.J. Buckingham, "Theory of acoustic propagation around a conical seamount," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 80, pp. 265, 1986.
- [10] I. Tolstoy, "Exact, explicit solutions for diffraction by hard sound barriers and seamounts," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 85, pp. 661, 1989.
- [11] D.R. Burns, "Acoustic and elastic scattering from seamounts in three dimensions-A numerical modeling study," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 92, pp. 2784, 1992.
- [12] C.R. Bradley, R.A. Stephen, "Modeling of seafloor wave propagation and acoustic scattering in 3-D heterogeneous media," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 100, pp. 225, 1996.
- [13] D.R. Jackson, A.N. Ivakin, "Scattering from elastic sea beds: First-order theory," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 103, pp. 336-345, 1998.
- [14] J.A. Fawcett, "Modeling scattering from azimuthally symmetric bathymetric features using wavefield superposition," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 122, pp. 3286-3295, 2007.
- [15] H. Schmidt, W. Luo, "Coupled mode modeling of 3-D propagation and scattering around conical seamount," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1272, no. 1, 2010.
- [16] R. Pannatoni, "Scattering of sound by a cylindrically symmetric seamount," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 135, 2014.
- [17] E.G.A. Costa, L. Godinho, A. Pereira, J.A.F. Santiago, "Prediction of acoustic wave propagation in a shallow water configuration using the method of fundamental solutions," *Journal of Computational Acoustics*, vol. 20, 2012.
- [18] T.F. Argo, "Laboratory measurements of sound speed and attenuation of water-saturated granular sediments," PhD Thesis, The University of Texas, Austin, 2012.
- [19] S.D. Frank, R.I. Odom, J.M. Collis, "Elastic parabolic equation solutions for underwater acoustic problems using seismic sources," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 3, pp. 1358-1367, 2013.
- [20] A.J. Duncan, A.N. Gavrilov, R.D. McCauley, I.M. Parnum, J.M. Collis, "Characteristics of sound propagation in shallow water over an elastic seabed with a thin cap-rock layer," *Journal of Acoustical*

ناهمواری بستر تیزتر باشد، شدت نوسانات نیز بیش‌تر خواهد بود. هم‌چنین، بررسی روند تغییرات افت تراگسیل برای هندسه مستطیلی، نشان داد که جنس‌های مختلف بستر تأثیر چشم‌گیری در رفتار این منغیر در عمق ۳۰ متری از آب، دریا ندارند. با مقایسه نمودارهای استخراج شده، نتیجه گرفته می‌شود در صورتی که ناهمواری‌های بستر دارای سطحی صاف باشند، جنس بستر تأثیر زیادی در افت تراگسیل صدا با بسامد پایین در عمق ۳۰ متری نمی‌گذارد. هم‌چنین، علت تأثیرگذاری بیشتر بستر سنگ خارا نسبت به ماسه‌سنگ بر افت تراگسیل صدا را می‌توان تفاوت زیاد سرعت صدا و چگالی سنگ خارا نسبت به آب دانست.

۵. فهرست منابع

- [1] H. Medwin, R. Spaulding, "Shadowing by seamounts," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 66, pp. S76, 1979.
- [2] K.M. Guthrie, R.N. Denham, R.W. Bannister, D.G. Browning, "The effect of seamounts on SOFAR propagation: Louisville Ridge II," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 68, pp. S52, 1980.
- [3] G.R. Ebbeson, R.G. Turner, "Acoustic reflections from a seamount in the northeast Pacific," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 68, pp. S78, 1980.
- [4] G.B. Morris, W.B. Fincke, "Acoustic shadowing and reflections from Stoddard Seamount, Northeast Pacific," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 69, pp. S59, 1981.
- [5] P.D. Koenigs, R.F. LaPlante, D.G. Browning, R.L. Martin, "Long-range sound propagation across Atlantic Ocean seamounts: Implications for ambient noise," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 69, pp. S59, 1981.
- [6] J.J. Sikora, "Sound propagation around underwater seamounts," M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2005.
- [7] C.H. Harrison, "Three-dimensional ray paths in basins, troughs, and near seamounts by use of ray invariants," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 62, pp. 1382, 1977.
- [8] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, H. Medwin, "Propagation over a seamount," *Journal of*

- Society of America, vol. 134, no. 1, pp. 207-215, 2013.
- [21] M.S. Ballard, B.M. Goldsberry, M.J. Isakson, "Normal mode analysis of three-dimensional propagation over a small-slope cosine shaped hill," *Journal of Computational Acoustics*, vol. 23, no.3, 2015.
- [22] P.C. Etter, "Underwater Acoustic Modeling and Simulation," Third edition, New York, Taylor & Francis, 2003.
- [23] F.B. Jensen, C.M. Ferla, "Numerical solutions of range-dependent benchmark problems in ocean acoustics," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 87, pp. 1499, 1990.