

اندازه‌گیری دقیق سطح منبع آکوستیکی شناورها در خلیج فارس

مهدی خوشحالی‌رودپشتی^{۱*}، محمد خوشحال‌رودپشتی^۲، مژگان دولتیاری‌سوران^۳، رضا افروزه^۴

۱- گروه مهندسی برق مخابرات میدان و امواج دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی برق، واحد لنگرود، دانشگاه آزاد اسلامی، لنگرود، ایران

۳- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی کاسپین، دانشگاه تهران، ایران

۴- گروه مهندسی برق مخابرات میدان و امواج دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شاهد، تهران، ایران

چکیده:

محاسبه سطح منبع صوتی کشتی در آب‌های کم‌عمق با استفاده از مدل‌های انتشار آکوستیک توجه بسیاری از محققان را در دهه‌های اخیر به خود جلب کرده است. اندازه‌گیری سطح منبع به دلیل کاربرد گسترده آن در ارتباطات زیرسطحی و مخابرات، حیات دریایی و زیست‌شناسی جانوران دریایی مانند نهنگ‌ها و دلفین‌ها و بسیاری کاربردهای متنوع دیگر بسیار مهم است. در این مقاله ابتدا سطح منبع پهنای باند را در محدوده فرکانسی کمتر از ۲۵۰۰ هرتز تحت شرایط عملیاتی و محیطی خاص و تحت یک استاندارد مشخص اندازه‌گیری می‌کنیم. سپس سطح منبع برای شناورهای مختلف در یک سوم اکتاو فرکانس‌های معمولی (۲۵، ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ هرتز) اندازه‌گیری شده و افت انتقال صوتی با استفاده از مدل‌های آکوستیک محاسبه شد. این مقاله یک تکنیک مدل‌سازی جدید را معرفی می‌کند که بر اساس حوزه زمان تفاضل محدود (FDTD) فرمول بندی شده است. در این روش مدل‌سازی عواملی مانند لایه‌بندی آب و بستر و تغییرات عمق فرستنده و گیرنده به عنوان متغیرهای اجتناب‌ناپذیر در اندازه‌گیری‌های میدانی لحاظ و محاسبه می‌شود. این تکنیک می‌تواند یک رویکرد محاسباتی مناسب برای اندازه‌گیری استاندارد سطح منبع در آب کم عمق ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی:

اندازه‌گیری، محیط‌های کم‌عمق، سطح صوت، فرکانس پایین

Accurate measurement of the acoustic source level of vessels in the Persian Gulf

Mahdi Khoshhali², Mohammad khoshhal³, Mojgan dolatyari⁴, Reza Afroozeh⁵

1,2,5- Department of Electrical, Field and Wave Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

3 Department of Electrical Engineering, Langarud Branch, Islamic Azad University, Langarud, Iran

4- Department of Chemical Engineering, Caspian Technical School, University of Tehran, Iran

Abstract

Calculation of ship sound source level in shallow waters using acoustic propagation models has attracted the attention of many researchers in recent decades. Source level measurement is important because of its wide application in subsurface communication and telecommunications, marine life and biology of marine animals such as whales and dolphins, and many other diverse applications. In this article, we first measure the bandwidth source level in the frequency range of less than 2500 Hz under specific operational and environmental conditions and under a specific standard. Then, the source level was measured for different floats in one-third octave of normal frequencies (25, 63, 125, 250 and 1000 Hz) and the sound transmission loss was calculated using acoustic models. This paper introduces a new modeling technique formulated based on finite difference time domain (FDTD). In this modeling method, factors such as layering of water and bed and depth changes of transmitter and receiver are considered and calculated as inevitable variables in field measurements. This technique can provide a suitable computational approach for standard source level measurement in shallow water.

Keywords:

Measurement, shallow environments, sound level, low frequency.

در چند دهه گذشته، صدای ناشی از ابزارهای دست‌ساز به دلایل مختلف از جمله حمل و نقل و توسعه سکوه‌های بازیابی هیدروکربن مانند نفت و گاز افزایش یافته است. علاوه بر این، افزایش ترافیک و سر و صدای ناشی از شناورها در این تغییرات بسیار مهم است [۱-۴]. امروزه معمولاً از نقشه‌های نویز برای ارزیابی تأثیر نویز در مکان‌های مختلف استفاده می‌شود که با داشتن ارزش واقعی شدت سطح صوتی منبع کشتی‌ها (SL) و بررسی میزان صدای تابش شده توسط شناورهای مختلف با مشخصات مختلف از جمله طول، سرعت و آب‌خور و غیره در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۵-۸]. سطح نویز تابشی (RNL) بر اساس استانداردهای بین‌المللی اندازه‌گیری می‌شود [۹، ۱۰]. استانداردها بر اساس این فرض که آب اقیانوس بسیار عمیق است تعیین شده است. استانداردهای اندازه‌گیری نیز برای آب‌های کم‌عمق در سال‌های اخیر در حال توسعه هستند (پروژه اخیر اروپایی موسوم به AQUO در حال توسعه استاندارد برای اندازه‌گیری صدای زیر آب در آب‌های کم‌عمق است) [۱۱]. هدف این مقاله ارائه یک رویکرد مناسب برای بهبود کیفیت اندازه‌گیری‌های استاندارد در آب کم عمق است و مدل صوتی پیشنهادی می‌تواند به طور قابل توجهی به محاسبه سطح منبع کشتی‌های مختلف در فرکانس‌های پایین کمک کند.

انتشار آکوستیک زیر آب تحت تأثیر متغیرهای زیادی از جمله سطح و کف محیط انتشار و لایه‌بندی آن و تجهیزات و تکنیک‌های اندازه‌گیری است که همگی در اندازه‌گیری سطح منبع عدم اطمینان ایجاد می‌کنند. مدل پیشنهادی می‌تواند با اعمال اصول محاسباتی عدم قطعیت ناشی از شرایط محیطی و روش اندازه‌گیری را کاهش داده و دقت محاسبات را افزایش دهد. یکی دیگر از ویژگی‌های مهم این مدل پیشنهادی، شکل سیگنال ارسالی است که بر خلاف مدل‌های معمولی، می‌تواند اشکال مختلفی از سیگنال‌ها را منتشر کند و اثر بازتاب زمان را بررسی کند. در این مقاله با استفاده از اصول استاندارد اندازه‌گیری و رعایت اصول کالیبراسیون، میزان صدای انتقالی توسط ۱۲ شناور تجاری و توریستی شامل شناورهای سبک وزن با وزن کمتر از ۵۰ تن و شناورهای سنگین‌وزن با وزن تقریبی بیش از ۱۰۰۰ تن مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر به دست آمده برای محاسبه افت انتقال صدای عبوری توسط شناورها استفاده

شد. علاوه بر این، برای فرکانس‌های بالای ۱۰۰ هرتز، مدل RAM توسعه‌یافته با استفاده از روش معادلات سهموی [۱۲] استفاده شد و برای محاسبه تلفات انتقال در فرکانس‌های زیر ۱۰۰ هرتز، مدل حوزه زمان تفاضل محدود (FDTD) معرفی شد [۱۳]. علاوه بر این، تغییرات در محیط انتشار شامل لایه‌بندی آب و تغییرات عمق گیرنده و فرستنده برای بررسی اثر بازتاب و گسترش امواج صوتی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین معادله تخمین اعمال تلفات انتشار در محاسبه سطح منبع از مدل پیشنهادی به‌دست آمد و سطوح منبع شناورها در دو حالت پهن‌بند و یک سوم اکتاو در فرکانس‌های مختلف محاسبه شد. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری، معادله‌ای برای محاسبه سطح منبع بر حسب طول کشتی به دست آمد. علاوه بر این، معادلات تجربی برای سه نوع مختلف کشتی به دست آمد که سطح منبع را با سرعت کشتی در فرکانس اکتاو یک سوم مرتبط می‌کند.

۲- اندازه‌گیری سطح نویز دریافت شده

۲-۱- روش اندازه‌گیری سطح نویز دریافتی

این بخش روش اندازه‌گیری نویز ارسالی از ۱۲ کشتی تجاری با طول بدنه، میزان آب‌خور و سرعت متفاوت را مورد بحث قرار می‌دهد. برای اندازه‌گیری نویز ارسالی از هیدروفون استاندارد شماره ۸۱۰۴ استفاده می‌شود. کالیبراسیون هیدروفون مطابق با استاندارد IEC 60565 انجام می‌شود. در این اندازه‌گیری، با استفاده از یک کابل و یک طناب، سیستم هیدروفون توسط یک بویه لنگر شده و چسبیده به کف بسته می‌شود و استاندارد B&K شماره (205-V/ μPa) با پاسخ فرکانس تخت در بازه مورد نظر (باریبل کمتر از ۲ دسی‌بل) در محدوده ۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز استفاده می‌شود و نتایج در فرکانس نمونه برداری ۲۴۰ کیلوهرتز ارائه می‌شود. تمام داده‌های صوتی توسط هیدروفون کالیبره شده استاندارد ثبت می‌شوند و تمام اندازه‌گیری‌ها از یک طرف کشتی‌ها در مانوری معروف به منحنی ویلیامسون انجام می‌شود (شکل ۱). هیدروفون در کف دریا قرار می‌گیرد. هر کشتی یا شناور با سرعت ثابت و شرایط عملیاتی در یک مسیر مشخص عبور می‌کند. طبق استانداردهای اندازه‌گیری، تمام شرایط عملیاتی باید در زمان آزمایش ثابت باشد. داده‌ها به دسی‌بل نسبت به فشار مرجع (μPa) بیان می‌شوند. برای محاسبه سطح نویز کشتی، ابتدا فشار مجذور میانگین مربع با استفاده از

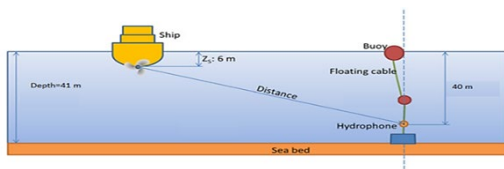
کشتی‌های ماهی‌گیری با طول کمتر از ۱۵ متر و کشتی‌های با طول بین ۱۵ تا ۳۵ متر به ویژه مسافری، حمل و نقل و کشتی‌های ماهی‌گیری و کلاس B شامل قایق‌هایی با طول بیش از ۳۵ متر از جمله کشتی‌های تانکر می‌باشد. برای محاسبه تلفات انتقال در فرکانس‌های زیر ۱۰۰ هرتز، از مدل FDTD و برای فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ هرتز از مدل آکوستیک وابسته به (RAM) استفاده می‌کنیم که در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۲- تعیین محل شناورها و هیدروفون‌ها

در اندازه‌گیری‌های میدانی، فواصل با استفاده از فاصله یاب لیزری و موقعیت‌یاب با استفاده از GPS ثبت می‌شوند. در عمق و فاصله گیرنده به دلایل مختلف از جمله شرایط دریا و روش اندازه‌گیری اطمینان وجود دارد و این اثر در محاسبات دقیق با استفاده از شبیه‌سازی و مدل‌سازی اعمال می‌شود. در طول دوره اندازه‌گیری، فاصله کشتی تا هیدروفون با استفاده از معادله ۲ تغییر می‌کند.

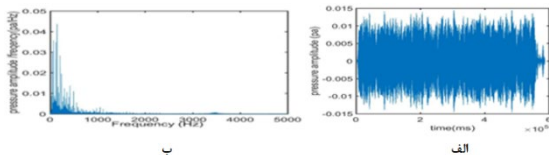
$$r_i^2 = (Depth - 1)^2 + dCPA^2 \quad (2)$$

جایی که dCPA نزدیک‌ترین فاصله کشتی تا نقطه اندازه‌گیری و r_i فاصله در نقطه اندازه‌گیری یکم است. معیار اندازه‌گیری فاصله مرکز صوتی شناور در مکانی بین موتور و ملخ نزدیک به پروانه کشتی است. شکل ۴ نحوه راه‌اندازی شناور و کشتی را نشان می‌دهد. در اندازه‌گیری‌های ما، $dCPA = 600 \text{ m}$.



شکل ۴- محل شناور و بویه

مشخصات عمومی شناور مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

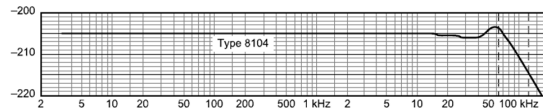


شکل ۵- نمونه ای از سیگنال دریافت شده توسط کشتی A07

محورهای افقی زمان انتشار را در مقیاس میلی ثانیه و محورهای Y دامنه فشار را در مقیاس Pa نشان می‌دهند. الف) در حوزه زمان، ب) در حوزه فرکانس

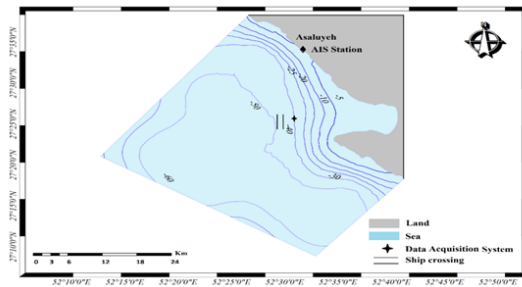
حساسیت هیدروفون استاندارد (B&K 8104) $(205 \text{ V}/\mu\text{Pa})$ با پاسخ فرکانسی مسطح (با ریبیل کمتر از ۲ دسی‌بل) در محدوده از طریق معادله (۱) در جایی که M حساسیت هیدروفون $(\text{V}/\mu\text{Pa})$ ، V_{rms} ولتاژ خروجی هیدروفون و P_{rms} فشار ورودی هیدروفون است.

$$M = \frac{V_{rms}}{P_{rms}} \quad (1)$$



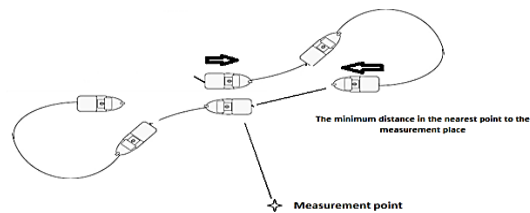
شکل ۱- پاسخ فرکانسی هیدروفون استاندارد (B&K 8104)

زمان دریافت اطلاعات ۵ دقیقه است که به ۱۰ بازه ۳۰ ثانیه‌ای تقسیم می‌شود و میزان نویز دریافتی هیدروفون برای هر بازه محاسبه می‌شود. در نهایت، سطح کل نویز به عنوان میانگین مقادیر حاصل محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری‌ها در قسمت غربی خلیج فارس انجام شد. محل کپسول داده برداری در شکل ۲ نشان داده شده است.



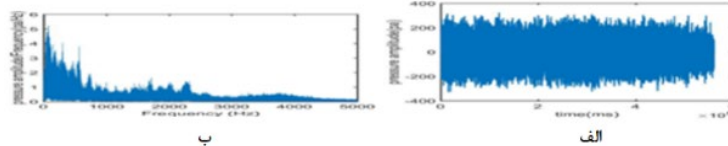
شکل ۲- مکان سیستم جمع‌آوری داده‌ها، گذرگاه‌های کشتی و ایستگاه AIS

هر کشتی با سرعت مشخصی عبور می‌کند. میانگین فشار آکوستیک مربعی در ۱ هرتز برای پهنای باند (۱ تا ۲۵۰۰ هرتز) و در یک سوم باند اکتاو ۲۵، ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳- مسیرهای مانور کشتی‌ها بر اساس منحنی ویلیامسون

سطح منبع برای ۱۲ کشتی تجاری، ماهی‌گیری و مسافری در دو کلاس A و B اندازه‌گیری می‌شود. کلاس A شامل



شکل ۶- نمونه ای از سیگنال دریافت شده توسط کشتی B01 محورهای افقی زمان انتشار را در مقیاس میلی ثانیه نشان می دهند و محورهای Y دامنه فشار را در مقیاس پاسکال نشان می دهند. (الف) در حوزه زمان، (ب) در حوزه فرکانس

جدول ۱- بانک داده ها و مخازن مورد استفاده در مطالعه

Vessel class	Vessel name	Engine type	Body type	Length (m)	Speed (kn)	Waterline depth (m)	Hydrophone depth (m)
A	A01	Propeller	Mono Hall	8.3	16.5	1	40
	A02	Propeller	Mono Hall	7.9	15	1	40
	A03	Propeller	Mono Hall	7	15	1	40
	A04	Propeller	Mono Hall	17	12.5	1.5	40
	A05	Propeller	Mono Hall	10	17	1.5	40
	A06	Propeller	Mono Hall	33	8	2.5	40
	A07	Propeller	Mono Hall	17	5	1.5	40
	A08	Propeller	Mono Hall	33.5	7	2.5	40
	A09	Propeller	Mono Hall	26.6	3.5	2.5	40
B	B01	Propeller	Mono Hall	150	8	17	40
	B02	Propeller	Mono Hall	110	5	15	40
	B03	Propeller	Mono Hall	52	4	12	40

فرکانس‌های ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز و عمق گیرنده ۴۰ متر (محل هیدروفون‌ها) و عمق فرستنده مربوط به مرکز آکوستیک کشتی در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نمونه‌هایی از انتشار صدا در محیط‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. گیرنده‌ها در فاصله ۱۰۰ تا ۶۰۰ متری و در عمق ۴۰ متری قرار دارند و هر گیرنده ۱۰۰ متر از گیرنده مجاور خود فاصله دارد و فرستنده‌ها در اعماق مربوط به مرکز صوتی شناور ۱، ۲، ۱۵ قرار می‌گیرند. نتایج برای هر فرکانس و عمق فرستنده مربوطه نیز در جداول نشان داده شده است. با استفاده از دستگاه CTD، سرعت صوت در نقطه پروفایل، اندازه گیری شد و در محاسبات اعمال شد و بستر در صدا مدل‌سازی شد. سرعتی معادل ۱.۳ برابر سرعت صوت در آب و ضریب تضعیف بستر و ویژگی‌های ژئوآکوستیک مربوطه در مدل اعمال شده است [۱۷]. طبق شکل ۷، کیفیت انتشار صدا برای فرکانس‌های مختلف و تأثیر زیرلایه بر روی متفاوت است. انتشار صدا در فرکانس‌های پایین به طور قابل توجهی بالاتر است. بنابراین برای فرکانس‌های پایین‌تر، از مدل پیشنهادی برای بررسی دقیق‌تر اثر بستر استفاده می‌کنیم. با استفاده از مدل پیشنهادی و با استفاده از میانگین فرکانس‌های مختلف، تلفات انتقال در فاصله ۶۰۰ متری از منبع برآورد شد. با توجه به اینکه ضریب تضعیف بستر برای فرکانس‌های زیر

۳- مدل‌های انتشار و پارامترهای محیطی

مدل‌های انتشار آکوستیک به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند. یک گروه بر اساس تئوری پرتو و گروه دیگر بر اساس نظریه موج است. بر اساس این دسته‌بندی، از مدل‌های استاندارد برای انتشار صوت استفاده می‌شود [۱۶-۱۴]. در این بخش ابتدا از مدل RAM برای محاسبه تلفات انتقال در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ هرتز استفاده می‌کنیم و سپس برای محاسبه تلفات انتقال در فرکانس‌های ۲۵ و ۶۳ هرتز از مدل پیشنهادی در این مقاله استفاده می‌کنیم. یکی از ویژگی‌های مدل پیشنهادی این است که پارامترهای محیطی مانند لایه‌بندی آب، اثر بستر و تأثیر شکل موج بر رهاسازی آن، تأثیر شرایط دریا و تأثیر تغییرات پروفایل سرعت بر انتشار صوت، تأثیر تغییرات آماری موقعیت فرستنده و گیرنده است و با استفاده از این مدل می‌توان تأثیر سایر نویزهای محیط را بر انتشار صدا اعمال کرد. در این مقاله تنها به بررسی تأثیر لایه‌بندی آب و تغییر موقعیت فرستنده و گیرنده می‌پردازیم.

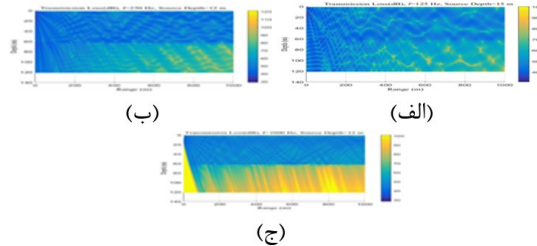
۳-۱- محاسبه افت فشار (PL) از طریق مدل RAM

در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰۰ هرتز

در این بخش از معادلات سهموی (PE) برای محاسبه تلفات انتقال استفاده می‌کنیم. برای این منظور

۱۰۰۰ هرتز و در فواصل زیر ۱ کیلومتر نزدیک به صفر است، افت انتقال می‌تواند با استفاده از معادله

$X(f, h_s, h_r) \log(r)$ محاسبه شود که در آن f فرکانس است و h_s و h_r به ترتیب عمق فرستنده و گیرنده هستند.



شکل ۷. انتشار صدا در فرکانس‌های مختلف با استفاده از مدل RAM. همانطور که مشاهده می‌شود، تلفات انتقال (dB) در بستر و در فرکانس‌های بالاتر بیشتر است و در فرکانس‌های پایین به بستر نفوذ می‌کند.

۳-۲- محاسبه تلفات انتقال با استفاده از مدل حوزه

زمان تفاضل محدود (FDTD)

در این مقاله، ما از مدل FDTD برای محاسبه تلفات انتقال برای فرکانس‌های پایین (۲۵ و ۶۳ هرتز) استفاده می‌کنیم. تلفات انتقال پارامتری است که برای محاسبه سطح منبع کشتی با توجه به معادله ۳ استفاده می‌شود.

$$SL = SPL + PL \quad (3)$$

جایی که $SPL = RL$ سطح صدای دریافتی توسط هیدروفون‌ها است و $PL = TL$ مخفف افت انتقال است. در اندازه‌گیری‌های میدانی که با استانداردهای مختلف انجام می‌شود، تلفات انتقال با قانون ۲۰ برابر لگاریتم I محاسبه می‌شود که مربوط به قانون انتشار کروی موج است. بر اساس این قانون، I فاصله گیرنده تا نقطه فرستنده است. برای آب‌های عمیق، این قانون معتبر است اما برای آب‌های کم عمق، از مدل‌سازی انتشار موج برای محاسبه تلفات انتقال استفاده می‌شود. مدل‌های استاندارد متفاوتی برای محاسبه افت انتقال استفاده می‌شوند [۱۴-۱۶]. همه مدل‌ها در حوزه فرکانس هستند و قادر به نمایش انتشار صدا در طول زمان نیستند. در این مدل، افت انتقال برای فرکانس‌های پایین و شرایط محیطی مختلف قابل اعمال است و نتایج دقیق‌تری را به همراه دارد.

۳-۲-۱- شبیه سازی محیط انتشار با استفاده از

مدل FDTD

این بخش به محیط انتشار صدا می‌پردازد. در این مدل‌سازی عواملی مانند لایه‌بندی آب و بستر اعمال

می‌شود. برای اعمال لایه‌بندی و اثر بستر، محیط انتشار را گسسته می‌کنیم. برای ایجاد محیط انتشار، ابتدا محیط دوبعدی را به یک شبکه مربع منظم با طول ضلع a گسسته می‌کنیم [۱۷-۲۰]. ابعاد کل محیط را $L_y = 124$ a و $L_x = 8096$ a در نظر می‌گیریم. سپس لایه‌بندی آب به صورت پروفایل با سه شیب مجزا (با استفاده از داده‌های تجربی اندازه‌گیری‌های میدانی) روی محیط اعمال می‌شود و بستر با پارامترهای چگالی و سرعت آن مدل‌سازی می‌شود.

۳-۲-۲- شبیه سازی موج صوتی با روش FDTD

پیشنهادی

انتشار امواج آکوستیک در محیطی با چگالی $\rho(\mathbf{r})$ و مدول حجمی $\lambda(\mathbf{r})$ با معادله موج اسکالر زیر بیان می‌شود [۲۰]:

(۴)

$$\rho(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} - \nabla \cdot [\lambda(\mathbf{r}) \nabla \Psi(\mathbf{r}, t)] = S(\mathbf{r}_s, t)$$

که در آن $\Psi(\mathbf{r}, t)$ اندازه جابجایی نقاط محیط نسبت به محل تعادل خود (فشار آکوستیک) و $S(\mathbf{r}_s, t)$ چشمه تولید موج در مکان \mathbf{r}_s می‌باشند. برای حل عددی معادله موج از روش گسسته‌سازی به شیوه‌ی تفاضل محدود استفاده شده است، بطوریکه مشتق زمانی را تا مرتبه‌ی دوم بصورت صریح و مشتقات مکانی را تا مرتبه‌ی چهارم بسط می‌دهیم. مشتق زمانی را به صورت زیر تا مرتبه‌ی دوم بسط می‌دهیم:

(۵)

$$\frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{\Psi^{n-1}(\mathbf{r}, t) - 2\Psi^n(\mathbf{r}, t) + \Psi^{n+1}(\mathbf{r}, t)}{\Delta t^2}$$

با روش دترمینال ضرایب مشتقات مرتبه‌ی اول و دوم دامنه‌ها را برحسب مقادیر آن‌ها در گره‌های مجاور بدست می‌آوریم؛ مانند رابطه ۵:

(۶)

$$\frac{\partial \psi(i, j, m)}{\partial x} = \frac{-\psi(i+2, j, m) + 8\psi(i+1, j, m) - 8\psi(i-1, j, m) + \psi(i-2, j, m)}{12\Delta x}$$

(۷)

$$\frac{\partial^2 \psi(i, j, m)}{\partial x^2} = \frac{\Psi(i+2, j, m) + 16\Psi(i+1, j, m) - 30\Psi(i, j, m) + 16\Psi(i-1, j, m) - \Psi(i-2, j, m)}{12\Delta x^2}$$

۳-۲-۳- شرایط فیزیکی انتشار

۳-۲-۳-۱- بررسی شرط پایداری جواب و مدلسازی

چشمه صوت ارسالی

در مدل شبیه سازی شده از پارامترهای زیر استفاده شده است.

$$\begin{aligned}\Delta x &= 1 \\ \Delta y &= 1 \\ \Delta z &= 1 \\ \Delta t &= 0.025\end{aligned}$$

(۸)

شرط پایداری حل عددی در انتشار موج توسط افراد گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷-۲۰]، ρ و λ به ترتیب چگالی و مدول حجمی می باشند.

$$v = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}}, \Delta u = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$$v \frac{\Delta t}{\Delta u} \leq 1$$

(۹)

با جاگذاری مقادیر جابجایی Δu و v در معادله ی بالا به شرط زیر می رسیم که همان شرط پایداری جواب می باشد.

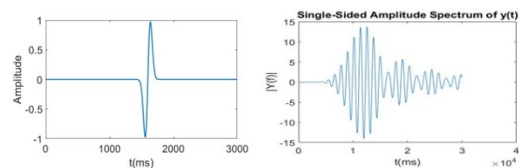
$$\sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \frac{\Delta t}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}} \leq 1$$

(۱۰)

شرط پایداری جواب از آن جهت دارای اهمیت است که در صورت عدم رعایت آن، جواب نادرست ناشی از خطای محاسبات رایانه، صحت نتایج را کم می کند. در این تحقیق شرط پایداری جواب نیز برای انتشار صوت اعمال گردید. از چشمه صوت با شکل سینوسی مطابق با رابطه زیر استفاده شد.

$$S(r,t) = A \sin(\omega t) \quad (11)$$

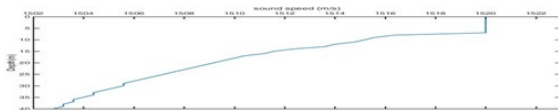
در رابطه A دامنه و ω سرعت زاویه ای چشمه صوت می باشد. در شکل های زیر (شکل ۸) یک نمونه از سیگنال تولید شده در حوزه زمان و فرکانس نشان داده شده است.



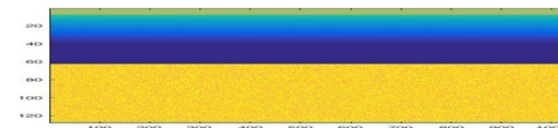
شکل ۸- نمایش حوزه زمان چشمه صوت با تابعیت مشتق گاوسی (الف) اصل چشمه صوتی. (ب) فرکانس ۲۵ هرتز فیلتر شده با پهنای یکسوم اکتاو و انتشار یافته در محیط.

۳-۲-۳-۲- پروفایل سرعت صوت و شرایط بستر

برای مدل استفاده شده در این مقاله با توجه به تعریف نقطه به نقطه چگالی و مدول یانگ محیط می توانیم سرعت صوت را در کل محیط شبیه سازی شده تعیین نماییم. صوت در دو محیط مختلف یکی با اعمال اثر لایه بندی و دیگری بدون اعمال اثر لایه بندی و با فرض یکنواخت بودن سرعت در عمق، انجام می گردد و اثر بستر نیز برای هر دو محیط به صورت رندوم در طول فاصله و با سرعتی معادل با ۱.۱ تا ۱.۲ برابر نسبت به سرعت صوت در آب تعریف می گردد. برای تابعیت این تغییرات سرعت با مسافت می توان از توابع رندوم دیگری استفاده کرد که بررسی و تحلیل آن را در نویسنده مقاله به عنوان ایده جدید پیشنهاد می کند. برای اعمال شرایط محیطی از پروفایل شکل ۹ استفاده می شود که بر اساس اندازه گیری میدانی با استفاده از دستگاه CTD در فصل تابستان اندازه گیری شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹- پروفایل سرعت صوت (الف) لایه بندی آب تا عمق ۴۰ متری. (از عمق ۴۰ متری تا بستر پروفایل سرعت صوت ثابت در نظر گرفته شده است) (ب) سرعت صوت در تمام نقاط محیط.

نمونه ای از نحوه انتشار موج آکوستیک شبیه سازی شده در محیطی با اعمال تغییرات سرعت لایه های آب و تغییرات رندوم بستر دریا که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است در انتشار صوت تاثیر داده شده است. با توجه به شیب بستر و پروفیل سرعت صوت نحوه انتشار به گونه ای می باشد که صوت از قسمت هایی که سرعت در آنها کمتر است عبور حداکثری دارد و قسمتی از صوت منتشر شده از بستر عبور می نماید.



شکل ۱۰- انتشار در محیط شبیه سازی شده با اعمال تغییرات لایه بندی آب و تغییرات به صورت رندوم بستر

Transmitter depth (m)	Receiver depth (m)	TL(dB)	F(Hz)
1	40	25 log r	25
2	40	25.3 log r	25
3	40	26 log r	25
12	40	26.7 log r	25
15	40	27 log r	25
17	40	27.4 log r	25
1	40	10.5 log r	63
2	40	10.8 log r	63
3	40	11.3 log r	63
12	40	13.3 log r	63
15	40	14.5 log r	63
17	40	14.6 log r	63

۴- برآورد سطح منبع صوت

۴-۱- برآورد سطح منبع با استفاده از محاسبات مدل سازی و ملاحظات عددی

این بخش به تلفات انتقال برای کشتی‌های مختلف در یک سوم اکتاو فرکانس‌های مرکزی ۲۵، ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز می‌پردازد. مقادیر تلفات انتقال به دست آمده از قوانین مختلف، مانند تلفات انتقال استاندارد، تلفات انتقال نظری، تلفات عملی و تلفات انتقال از مدل محاسباتی در جداول زیر گزارش شده‌اند. در روش استاندارد ISO1702 تلفات انتقال برای تمامی حالت‌های 20log r در نظر گرفته می‌شود که همان تلفات انتقالی ناشی از انبساط هندسی موج کروی منتشر شده است و برای آب‌های عمیق با dCPA پایین معتبر است و این تقریب در همه جا معتبر نیست. برای آب کم‌عمق و با dCPA بالا و با رعایت شرط میدان دور از تقریب 10log r که مربوط به انتشار استوانه‌ای یا قانون تلفات انتقال نظری است استفاده می‌شود، اما با توجه به اینکه قسمتی از انتشار کروی و قسمت دیگر انتشار به صورت استوانه‌ای است برخی دانشمندان از رابطه تقریبی افت انتقال عملی 15log r استفاده می‌کنند. در این مقاله برای فرکانس‌های پایین از معادله به دست آمده از مدل انتشار موج FDTD و در فرکانس‌های برابر با ۱۲۵ و بالاتر از مدل RAM که وابسته به شرایطی مانند عمق گیرنده و فرستنده و شرایط لایه‌بندی و بستر استفاده می‌شود. عمق فرستنده مربوط به خط آبخور کشتی است که برای کشتی‌های کوچک کمتر از ۱ متر و برای کشتی‌های بزرگ ۱۷ متر است.

۳-۳-۲-۳- مکان فرستنده و گیرنده در شبیه سازی

در محیط شبیه‌سازی شده، منبع صوتی مشتق گاوسی شروع به انتقال یک موج صوتی با مشتق گاوسی در اعماق مربوط به مرکز صوتی کشتی (خط آبخور کشتی)، یعنی ۱، ۲، ۳، ۱۲، ۱۵ و ۱۷ متر می‌کند. در شکل ۹ نشان داده شده است). گیرنده‌های صدا در فاصله ۴۰ متری (تخت بستر) و در هر عمق ۱۲ هیدروفون در فواصل ۵۰ تا ۶۰۰ متری به فاصله ۵۰ متر از هم قرار دارند.

گیرنده‌ها فشار میانگین مربعات مجذوری را با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آورند.

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt} \quad (12)$$

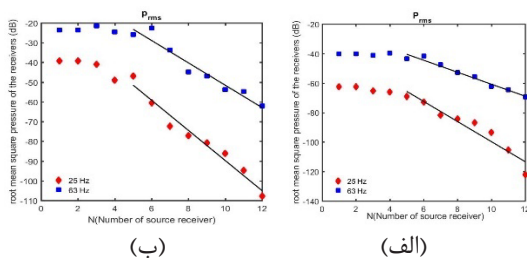
T، کل بازه زمانی دریافت داده توسط دریافت‌کننده و p، فشار در نقطه مورد نظر می‌باشد.

۴-۲-۳- رابطه فشار متوسط با فاصله، فرکانس و عمق گیرنده و فرستنده

این بخش میانگین فشار ثبت شده توسط سنسورهای مختلف در عمق ۴۰ متری از سطح را بر حسب فاصله افقی از جهت فرستنده برای فرکانس‌های مختلف و موقعیت‌های فرستنده مختلف بررسی می‌کند. شکل ۶ میانگین فشار مربع ریشه ثبت شده توسط ۱۲ هیدروفون برای گیرنده n در عمق ۴۰ متری را نشان می‌دهد که قسمت انتهایی آن دارای تابع خطی است و شیب خطوط نصب شده با α نشان داده شده است. با توجه به اینکه ریشه میانگین فشار مربع بر حسب فاصله با رابطه خطی برازش می‌شود، می‌توان معادلات زیر را تخمین زد در معادله زیر، r فاصله از هیدروفون‌های گیرنده در جهت فرستنده یا منبع و N گیرنده است.

$$p_{rms} \cong 10^{\lambda N + \alpha} \quad (13)$$

$$N \propto r$$



شکل ۱۱- معادله فشار متوسط؛ الف) معادله فشار متوسط بر حسب عمق فرستنده در ۱ متر، ب) معادله فشار متوسط بر حسب عمق فرستنده در ۱۵ متر.

جدول ۲- نتایج شبیه سازی

جدول ۳- نتایج افت انتقال برای شناورهای A01 و A02 و A03

Frequency (dB)	Transmitter depth (m)	Receiver depth(m)	d_{CPA} (m)	Spherical transition loss	Cylindrical transition loss	Practical transition loss	Model transition loss	
							FDTD	RAM
25	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
63	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
125	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.2\log r$
250	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.4\log r$
500	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$18.8\log r$
1000	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$18.2\log r$

جدول ۴- نتایج افت انتقال برای شناورهای A04 و A05 و A06

Frequency (dB)	Transmitter depth(m)	Receiver depth (m)	d_{CPA} (m)	Spherical transition loss	Cylindrical transition loss	Practical transition loss	Model transition loss	
							FDTD	RAM
25	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
63	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
125	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.2\log r$
250	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.5\log r$
500	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$18.6\log r$
1000	1	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$18.5\log r$

جدول ۵- نتایج افت انتقال برای شناورهای A06 و A07 و A08

Frequency (dB)	Transmitter depth (m)	Receiver depth (m)	d_{CPA} (m)	Spherical transition loss	Cylindrical transition loss	Practical transition loss	Model transition loss	
							FDTD	RAM
25	3	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
63	3	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
125	3	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$18.8\log r$
250	3	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.4\log r$
500	3	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.7\log r$
1000	3	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$16.3\log r$

جدول ۶- نتایج افت انتقال برای شناورهای A01

Frequency (dB)	Transmitter depth (m)	Receiver depth(m)	d_{CPA} (m)	Spherical transition loss	Cylindrical transition loss	Practical transition loss	Model transition loss	
							FDTD	RAM
25	12	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
63	12	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
125	12	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$15.7\log r$
250	12	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17.5\log r$
500	12	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$16.6\log r$
1000	12	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$16.6\log r$

جدول ۷- نتایج افت انتقال برای شناورهای B03

Frequency (dB)	Transmitter depth (m)	Receiver depth(m)	d_{CPA} (m)	Spherical transition loss	Cylindrical transition loss	Practical transition loss	Model transition loss	
							FDTD	RAM
25	15	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
63	15	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
125	15	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$15.8\log r$
250	15	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$15.4\log r$
500	15	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$16.8\log r$
1000	15	40	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$17\log r$

جدول ۸- نتایج افت انتقال برای شناورهای A02

Frequency (dB)	Transmitter depth (m)	Receiver depth (m)	d_{CPA} (m)	Spherical transition loss	Cylindrical transition loss	Practical transition loss	Model transition loss	
							FDTD	RAM
25	17	60	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
63	17	60	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$	Table 2	
125	17	60	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$16.5\log r$
250	17	60	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$14.4\log r$
500	17	60	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$15.2\log r$
1000	17	60	450	$20\log r$	$10\log r$	$15\log r$		$15.2\log r$

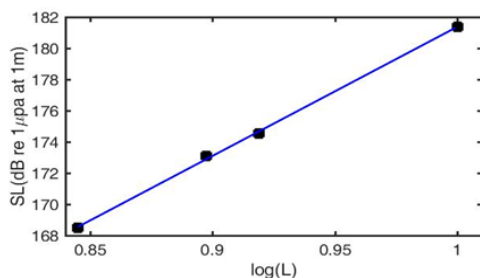
۲-۴- اندازه گیری سطح منبع په‌ن باند

پس از محاسبه تلفات انتقال با استفاده از مدل پیشنهادی و مدل استاندارد RAM، سطح منبع په‌ن باند را در محدوده فرکانس ۱ تا ۲۵۰۰ هرتز محاسبه می‌کنیم. جدول ۹ شرایط اندازه‌گیری را برای ۱۲ شناور مختلف نشان می‌دهد. در زمان اندازه‌گیری، شناورها دارای سرعت‌های ثبت‌شده و شرایط میدانی یکسان بر اساس اصول اندازه‌گیری استاندارد بودند.

جدول ۹- سطح منبع اندازه‌گیری شده برای کلاس‌های مختلف

Vessel class	Vessel name	Engine type	Body type	Length (m)	Speed (knot)	Waterline depth (m)	Hydrophone depth (m)
A	A01	Propeller	Mono Hall	8.3	16.5	1	40
	A02	Propeller	Mono Hall	7.9	15	1	40
	A03	Propeller	Mono Hall	7	15	1	40
	A04	Propeller	Mono Hall	17	12.5	2	40
	A05	Propeller	Mono Hall	10	17	2	40
	A06	Propeller	Mono Hall	33	8	3	40
	A07	Propeller	Mono Hall	17	5	2	40
	A08	Propeller	Mono Hall	33.5	7	3	40
	A09	Propeller	Mono Hall	26.6	3.5	3	40
B	B01	Propeller	Mono Hall	150	8	17	60
	B02	Propeller	Mono Hall	110	5	15	40
	B03	Propeller	Mono Hall	52	4	12	40

نمودار و قطع آن، می‌توان معادله تجربی برای کشتی‌های کوچک با سرعت یکسان (۱۵ گره) به دست آورد.

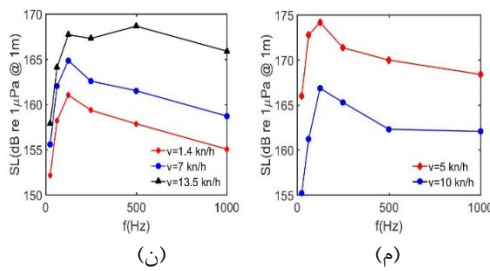


شکل ۱۲- سطح منبع په‌نای باند بر حسب طول کشتی با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده است (سرعت کشتی‌ها تقریباً برابر است).

نتایج اندازه‌گیری سطح منبع نشان می‌دهد که شناورهای کلاس A و با طول تقریبی ۷ تا ۳۵ متر (به استثنای شناور A06) دارای ارزش سطح منبع ۱۷۴ تا ۱۷۸ دسی‌بل و شناورهای کلاس B (۵۰ تا ۱۵۰ متر) دارای سطح منبع په‌نای باند ۲۱۴ تا ۲۲۰ دسی‌بل است. این نتایج با نتایج تجربی مشاهده شده توسط آلن و همکاران [۸] مطابقت دارد. برای چهار کشتی ماهی‌گیری با طول کمتر از ۱۰ متر و شرایط اندازه‌گیری یکسان، سطح منبع په‌ن باند در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که نمودار سطح منبع بر حسب لگاریتم رسم شده است. طول کشتی و نقاط توسط یک تابع خطی برازش شده است و با توجه به شیب

جدول ۱۰- مقایسه سطوح منبع صوتی اندازه گیری شده و مقایسه با مقالات دیگر

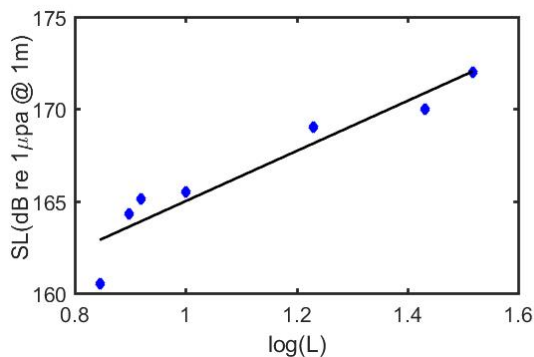
Vessel type	Length (m)	Source level	Measurement source	Prediction with the proposed equation	Mean difference
Fishing	12.1	187	Allen 2012 [8]	188.2546	1.2
Fishing	11.3	184	Allen 2012 [8]	185.7949	1.7
Fishing	10.4	182	Allen 2012 [8]	182.8104	0.8
Fishing	11.6	187	Allen 2012 [8]	186.7371	0.3
Small vessels	7.5-10	170-180	Richardson 1995 [2]	171-181	1



شکل ۱۳- سطح منبع صوتی انتشاری از شناور در یک سوم اکتاو باند فرکانس‌های مختلف در سرعت‌های مانور متفاوت برای کلاس‌های الف) A01 ب) A02 ج) A03 د) A04 ر) A05 ز) A06 م) A07 ن) A08.

۲-۳-۴- اندازه گیری سطح منبع صوتی شناور در یک سوم اکتاو باند ۱۰۰ هرتز بر حسب طول

فشار آکوستیک در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز برای ۷ کشتی ماهی‌گیری با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در شرایط استاندارد در محدوده باند اکتاو سوم با فرکانس مرکزی ۱۰۰ هرتز بود. شکل ۱۴ لگاریتم طول کشتی را نشان می‌دهد. داده‌های شکل با تابع خطی برازش داده شده‌اند و معادله تجربی با رابطه ۱۲ بدست آمده با یافته‌های سایر مطالعات علمی مطابقت دارد [۶، ۷].

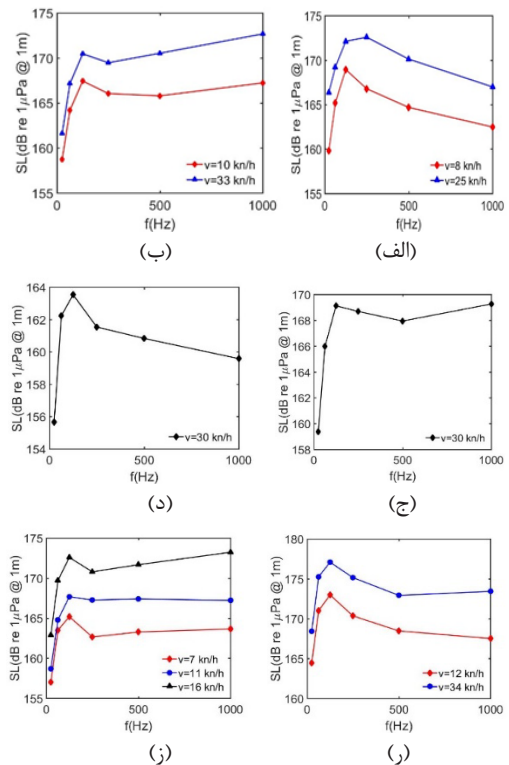


شکل ۱۴- سطح صوت در یک سوم اکتاو باند ۱۰۰ هرتز بر حسب شناورهای با طول مختلف و سرعت برابر.

$$SL = 13.6029 \log(L) + 151.3935 \quad (14)$$

۳-۴- اندازه گیری سطح منبع صوتی یک سوم اکتاو ۱-۳-۴- اندازه گیری سطح منبع صوتی بر حسب باند یک سوم اکتاو فرکانس مورد نظر

سطوح منبع در یک سوم اکتاو باندهای مختلف متفاوت است. در شکل‌های زیر، نمودارهای سطح منبع برای چندین کلاس کشتی نشان داده شده است. مقادیر سطح منبع با استفاده از قانون تلفات انتقال استاندارد برای یک سوم فرکانس اکتاو و فرکانس برای کلاس‌های مختلف کشتی‌ها با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده، همانطور که در شکل‌های زیر نشان داده شده است (شکل ۸).

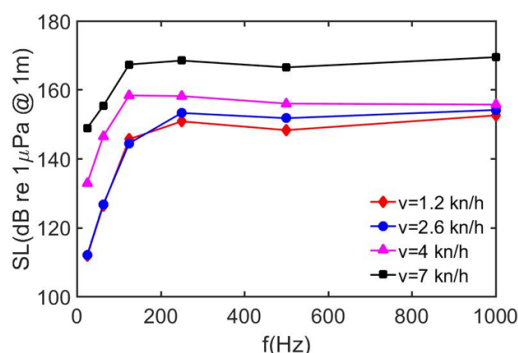
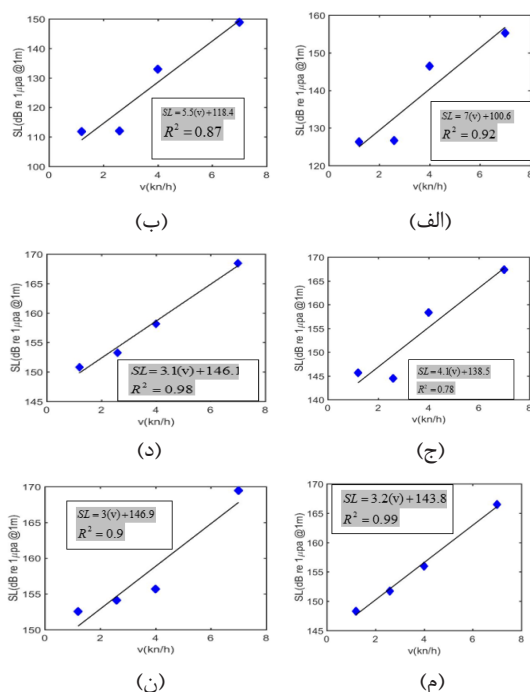


Vessel type	Length (m)	Source level	Measurement source	Prediction with the proposed equation	Prediction with urick equation [24]
Carrier	173	180	McKenna 2012 [6]	181.8	162
Cargo	199	181.8	McKenna 2012 [6]	182.6	167
Cargo	347	188	McKenna 2013 [7]	186	184.1

۳-۳-۴- اندازه گیری سطح منبع صوتی شناور

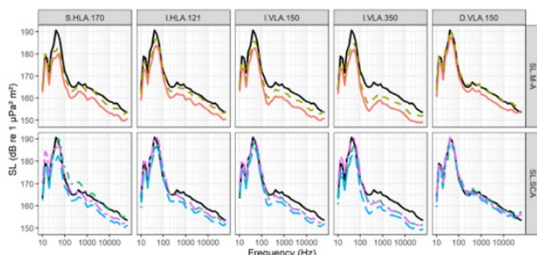
بر حسب سرعت و بدست آوردن رابطه

سطح فشار آکوستیک برای کشتی کلاس A09 با طول ۲۶۶ متر در سرعت های مختلف اندازه گیری شد. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، هنگامی که سرعت کشتی افزایش می یابد؛ فشار صوتی نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۵- سطح منبع اندازه گیری شده بر حسب یک سوم فرکانس اکتاو برای کشتی A09

همانطور که در شکل بالا نشان داده شده است؛ سطح منبع اندازه گیری شده بر حسب سرعت رابطه مستقیمی با فرکانس دارد. شکل های زیر مقادیر سطح منبع اندازه گیری شده در یک سوم اکتاو فرکانس های مختلف را برای کشتی A09 نشان می دهد. نمودارهای حاصل با یک تابع خطی برازش داده شده اند و شیب نمودارها نیز در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش فرکانس، روند افزایشی سطح منبع از نظر سرعت کاهش می یابد و تقریباً ثابت می شود. فرکانس های ۲۵، ۶۳، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز، همانطور که برای کشتی A09 نشان داده شده است.



شکل ۱۷- نتایج حاصل از اندازه گیری سطح فشار آکوستیکی شناورهای مختلف در فرکانس ها و فواصل مختلف. نتایج مرجع ۲۲ مقاله

نتایج بدست آمده از این مقاله همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است با نتایج مقاله های تجربی معتبر دنیا مطابقت قابل ملاحظه دارد [21,22].

نتایج

برای اندازه گیری دقیق در آب های کم عمق، لازم است از مدل سازی آکوستیک برای محاسبه و اعمال تلفات انتقال صوت و اثر انعکاس روی سطح و بستر با استفاده از محاسبات کامپیوتری انجام شود. در این مقاله ابتدا سطح منبع صوتی انتشار یافته از چندین کلاس مختلف شناور با استفاده از روش استاندارد محاسبه شد. مدل سازی RAM برای محاسبه تلفات انتقال در فرکانس های بالای ۹۰۰ هرتز و محاسبات جدید توسعه یافته بر اساس روش FDTD برای محاسبه تلفات انتقال در فرکانس های پایین تر مورد استفاده قرار گرفت. مدل پیشنهادی می تواند عدم قطعیت در اندازه گیری ها و اثر بازتاب از سطح زیرلایه را توضیح دهد که با مدل های معمولی و سایر مدل های موجود نمی توان آن را به راحتی تشخیص داد، شناورهای مورد استفاده در این مطالعه ۱۲ فروند بودند که به دو کلاس A و کلاس B (سنگین)، به ترتیب شامل ۹ و ۳ کشتی، که سطوح صوتی انتشاری از آنها در دو فرکانس پهن باند (۱ تا ۲۵۰۰ هرتز) و یک سوم اکتاو فرکانس ۲۵، ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ Hz مورد بررسی قرار گرفت. سطوح صوتی انتشاری پهنای باند شناورهای کوچک با طول کمتر از ۱۵ متر اندازه گیری گردید و به صورت رابطه ای تجربی نمایش داده شد. با اندازه گیری سطح صوتی انتشاری در یک سوم باند فرکانسی اکتاو ۱۰۰۰ هرتز برای هفت شناور مختلف با طول های متفاوت و رابطه تجربی بدست آمد که با نتایج سایر مقالات همخوانی بالایی دارد. علاوه بر این، نتایج ما نشان می دهد و نهایتاً مقادیر سطح منبع صوتی انتشاری برای شناورهای کلاس A09 بر حسب سرعت کشتی در فرکانس های مختلف محاسبه شد و به صورت رابطه تجربی نمایش داده شد و مقادیر حاصل با داده های مطالعه McKenna (2013) نزدیک و قابل مقایسه بود [7]. نتایج این مقاله جهت هوشمندسازی انواع شناورهای دریایی در خلیج فارس دارای اهمیت اساسی می باشد. می توان از نتایج حاصل برای هوشمندسازی انواع شناورهای زیرسطحی و سطحی بهره گرفت.

تشکر و قدردانی

از آقایان دکتر علی اصغر آبنیکی و دکتر عباس اسدزاده و از تمامی دوستانی که در این تحقیق یاور ما بودند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

1. R. C. Gisiner, "Workshop on the Effects of Anthropogenic Noise in the Marine Environment, 10-12 February 1998. Proceedings," OFFICE OF NAVAL RESEARCH ARLINGTON VA MARINE MAMMAL AND BIOLOGICAL OCEANOGRAPHY PROGRAM 1998.
2. W. J. Richardson, K. J. Finley, G. W. Miller, R. A. Davis, and W. R. Koski, "Feeding, social and migration behavior of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, in Baffin Bay vs. the Beaufort Sea—regions with different amounts of human activity," *Marine mammal science*, vol. 11, pp. 1-45, 1995.
3. E. H. Buck, "Acoustic Thermometry of Ocean Climate: Marine Mammal Issues," 1995.
4. R. K. Andrew, B. M. Howe, J. A. Mercer, and M. A. Dzieciuch, "Ocean ambient sound: comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast," *Acoustics Research Letters Online*, vol. 3, pp. 65-70, 2002.
5. L. S. Wang and P. Theobald, "Calculation of ship source level in shallow water by propagation modelling," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2016, pp. 3576-3582.
6. M. F. McKenna, D. Ross, S. M. Wiggins, and J. A. Hildebrand, "Underwater radiated noise from modern commercial ships," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, pp. 92-103, 2012.
7. M. F. McKenna, S. M. Wiggins, and J. A. Hildebrand, "Relationship between container ship underwater noise

- Massachusetts Institute of Technology*, 2004.
- 15.M. B. Porter, "The bellhop manual and user's guide: Preliminary draft," *Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep*, 2011.
 - 16.M. B. Porter, "The KRAKEN normal mode program," NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC1992.
 - 17.P. C. Etter, *Underwater acoustic modeling and simulation*: CRC Press, 2013.
 - 18.M. Dablain, "The application of high-order differencing to the scalar wave equation," *Geophysics*, vol. 51, pp. 54-66, 1986.
 - 19.M. D. Collins, "A split-step Padé solution for the parabolic equation method," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, pp. 1736-1742, 1993.
 - 20.S. MEHDI VAEZ ALLAEI and M. SAHIMI, "Shape of a wave front in a heterogenous medium," *Physical review letters*, vol. 96, 2006.
 21. Ainslie MA, Martin SB, Trounce KB, Hannay DE, Eickmeier JM, Deveau TJ, Lucke K, MacGillivray AO, Nolet V, Borys P. International harmonization of procedures for measuring and analyzing of vessel underwater radiated noise. *Mar Pollut Bull.* 2022 Jan;174:113124. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.113124. Epub 2021 Dec 14. PMID: 34915419.
 22. MacGillivray AO, Martin SB, Ainslie MA, Dolman JN, Li Z, Warner GA. Measuring vessel underwater radiated noise in shallow water. *J Acoust Soc Am.* 2023 Mar;153(3):1506.doi:10.1121/10.017433. PMID: 37002101
 - levels and ship design, operational and oceanographic conditions," *Scientific reports*, vol. 3, p. 1760, 2013.
 - 8.J. K. Allen, M. L. Peterson, G. V. Sharrard, D. L. Wright, and S. K. Todd, "Radiated noise from commercial ships in the Gulf of Maine: Implications for whale/vessel collisions," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, pp. EL229-EL235, 2012.
 - 9.C. De Jong, M. Ainslie, and G. Blacquiére, "Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing," *Report no TNO-DV C*, vol. 251, 2011.
 - 10.L. Wang and S. Robinson, "A COMPARISON OF METHODS FOR MEASURING SHIP SOURCE LEVEL IN SHALLOW WATER."
 - 11.A. M. Rodríguez, R. S. Mullor, P. B. Palomo, E. Baudin, and V. Lamaison, "New European underwater noise measurement standard developed in the AQUO project," in *OCEANS 2015-Genova*, 2015, pp. 1-6.
 - 12.M. D. Collins, "A self-starter for the parabolic equation method," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, pp. 2069-2074, 1992.
 - 13.M. Khoshhali and H. Hamzeshpour, "Wave front properties of acoustic wave in disorder fractured media," *Transport in Porous Media*, vol. 107, pp. 129-140, 2015.
 - 14.H. Schmidt, "OASES version 3.1 user guide and reference manual," *Department of Ocean Engineering*,