

تأثیر لایه حبابی ناشی از باد بر مکان‌یابی منبع صدا به روش میدان تطبیقی در آب کم‌عمق

وحید زارع‌پور^۱، مجتبی عظام^{۱*}، سارا اله‌یاری بیک^۱، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲

۱. گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲. گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴

چکیده

این مقاله از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای و با استفاده از روش پردازش میدان تطبیقی، اثر لایه حبابی ناشی از باد را بر مکان‌یابی منبع صوتی زیرآبی در محیط کم‌عمق خلیج فارس بررسی می‌نماید. یک منبع صوتی زیرآبی با بسامد ۲-۱۰ کیلوهرتز در فاصله چهار کیلومتری از یک آرایه گیرنده عمودی خطی، در عمق‌های ۱۰، ۴۵ و ۷۵ متری در نظر گرفته شد. با استفاده از پردازش گر میدان تطبیقی بیشینه-لایک‌لیهود، تخمین برد و عمق منبع در حالت تطابق انجام گردید. سپس خطاهای تخمین ناشی از اثر عدم تطابق در سرعت صوتی لایه حبابی (متأثر از سرعت‌های باد مختلف) استخراج شدند. نتایج نشان دادند که اگر چه با افزایش درجه عدم تطابق و بسامد منبع، خطای مکان‌یابی افزایش می‌یابد، اما مقادیر خطا تنها برای سرعت‌های باد بیش از ۸ متر بر ثانیه، در بسامدهای بزرگ‌تر و مساوی ۸ کیلوهرتز قابل‌توجه (بیش از ۱ درصد) است. همچنین برای بیش‌ترین درجه عدم تطابق در بالاترین بسامد مورد نظر، مقدار بیشینه خطا در تخمین برد و عمق منبع به ترتیب ۲/۵ و ۴/۵ درصد است. به‌علاوه میزان این خطاها به عمق منبع وابسته است، به‌طوری‌که برای منبع واقع در عمق ۱۰ متری (نزدیک‌تر به لایه حبابی) نسبت به دو عمق منبع دیگر، خطا بیش‌تر است.

کلیدواژه‌ها: لایه حبابی ناشی از باد، مکان‌یابی منبع، عدم تطابق، صفحه ابهام برد-عمق، پردازش میدان تطبیقی.

۱. مقدمه

از یک الگوی انتشار صوتی زیر آب، میدان الگوسازی‌شده براساس یک مکان تخمینی برای منبع و یک الگوی محیطی^۹ مفروض، پیش‌بینی می‌شود. یک درجه بالا از همبستگی یا تطابق^{۱۰}، بین میدان‌های اندازه‌گیری‌شده و الگوسازی‌شده نشان‌دهنده احتمال بالای وجود منبع صوتی در موقعیت تخمینی است. کارایی این فن، شدیداً به داشتن اطلاعات کافی و دقیق از شبه‌سنج‌های^{۱۱} محیطی وابسته است؛ زیرا این اطلاعات، پیش‌بینی دقیق میدان فشار صوتی زیرآبی را با استفاده از الگوی انتشار صوتی زیرآب میسر می‌سازد. چنانچه داده‌های محیطی که جهت محاسبه میدان الگوسازی‌شده به کار می‌روند، دقیق یا کامل نباشند، یک عدم‌تطابق^{۱۲} میان میدان

هدف از روش پردازش میدان تطبیقی^۱ زیرآبی، مکان‌یابی منبع صوتی^۲ در محیط زیر آب است. اساساً در این فن^۳، میزان همبستگی^۴ میدان فشار صوتی اندازه‌گیری‌شده^۵ با میدان فشار صوتی الگوسازی‌شده^۶ مورد بحث قرار می‌گیرد. میدان فشار صوتی اندازه‌گیری‌شده ناشی از یک منبع صوتی زیر آبی واقعی مستقر در یک مکان معلوم است که در هر یک از هیدروفون‌های^۷ یک آرایه گیرنده عمودی خطی^۸ دریافت می‌شود. از طرف دیگر، با استفاده

* نویسنده پاسخگو: ezam@srbiau.ac.ir

¹ MFP; Matched Field Processing

² Sound source localization

³ Technique

⁴ Correlation

⁵ Measured acoustic pressure field

⁶ Model

⁷ Hydrophones

⁸ Vertical linear receiver array

⁹ Environment model

¹⁰ Match

¹¹ Parameters

¹² Mismatch

دارای ترموکلاین^۶ را بررسی نمودند [۱۱]. در سال ۲۰۱۹ گروسکی و دولینگ، در تحقیق خود اثر عدم تطابق عمق آب را لحاظ نمودند [۱۲]. بیون و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی اثر عدم تطابق در سرعت صوتی آب پرداختند [۱۳]. نتایج همه این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که عدم تطابق شبه‌سنجه‌های محیطی موجب کاهش کارایی روش پردازش میدان تطبیقی در مکان‌یابی منبع صوتی زیرآبی می‌گردد.

تاکنون در خصوص تأثیر لایه حبایی ناشی از باد بر کارایی روش پردازش میدان تطبیقی تحقیقی انجام نشده است. از این‌رو، در این تحقیق خطای مکان‌یابی منبع صوتی زیرآبی به روش پردازش میدان تطبیقی، ناشی از عدم تطابق سرعت صوتی در لایه حبایی ناشی از باد که در نزدیک سطح دریا شکل می‌گیرد، بررسی خواهد شد. هم‌چنین در این تحقیق، حالات مختلف عدم تطابق ناشی از لایه حبایی، در بسامدهای مختلف و در عمق‌های متمایز استقرار منبع صوتی بررسی می‌گردد. این روی‌کرد چندوجهی به مسأله از ویژگی‌های بارز این پژوهش است. این تحقیق برای بسامدهای صوتی ۲-۱۰ کیلوهرتز و عدم تطابق سرعت صوتی لایه حبایی نزدیک سطح به میزان ۴/۷-۱۷/۲ متر بر ثانیه، ناشی از سرعت‌های باد ۶/۶-۱۰/۲ متر بر ثانیه انجام گردیده است. همان‌گونه که در ادامه شرح داده می‌شود، از آن‌جا که لایه حبایی نزدیک سطح دریا، پراکنش سطحی را تقویت می‌نماید، انتظار می‌رود میدان فشار صوتی اندازه‌گیری‌شده در آرایه گیرنده هیدروفونی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اثر این لایه قرار گیرد. بنابراین، همبستگی بین میدان‌های بدون اغتشاش (شرایط تطابق) و میدان‌های اغتشاشی (شرایط عدم تطابق) تنزل خواهد یافت و خطا در مکان‌یابی منبع صوتی می‌تواند رخ دهد. در این تحقیق، تخمین‌های برد و عمق منبع صوتی در قالب یک صفحه ابهام برد-عمق^۷ نمایش داده می‌شوند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. پردازشگر میدان تطبیقی

فن^۸ میدان تطبیقی به‌کار رفته در این تحقیق، پردازشگر

اندازه‌گیری‌شده و میدان الگوسازی‌شده پدید می‌آید که منجر به خطا در تخمین مکان منبع صوتی خواهد شد. در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در خصوص اثر عدم تطابق محیطی بر کارایی روش پردازش میدان تطبیقی انجام شده است. به‌طور مثال، پورتر و همکاران در سال ۱۹۸۷، در خصوص اثر عدم تطابق در مشخصه‌های بستر، ضخامت لایه رسوبی و نیم‌رخ سرعت صوتی آب بحث کرده‌اند [۱]. دلبالزو و همکاران در سال ۱۹۸۸، اثر عدم تطابق در عمق آب ناشی از امواج دورا^۱ و یا تغییر جذر و مد را در محیط کم‌عمق مطالعه نمودند [۲]. در سال ۱۹۸۹ فیولید و همکاران، اثر عدم تطابق در عمق آب، نیم‌رخ سرعت صوتی آب، چگالی و تضعیف لایه رسوبی را در آب کم‌عمق مورد تحقیق قرار دادند [۳]. گینگراس در سال ۱۹۸۹، حساسیت روش پردازش میدان تطبیقی را به عدم تطابق در سرعت صوتی مطالعه نمود [۴]. در سال ۱۹۸۹ تولستوی، در تحقیق خود به اثر عدم تطابق در سرعت صوتی آب بر روش پردازش میدان تطبیقی پرداخت [۵]. دائورتی و همکاران در سال ۱۹۹۰، اثر عدم تطابق ناشی از امواج سطحی و امواج درونی^۲ را در آب کم‌عمق بررسی نمودند [۶]. در سال ۱۹۹۰ اشمیت و همکاران اثر عدم تطابق در سرعت صوتی آب دریا را بر چند پردازشگر میدان تطبیقی مطالعه نمودند [۷]. پورتر و تولستوی در سال ۱۹۹۴، اثر عدم تطابق شبه‌سنجه‌های محیطی مختلف شامل سرعت صوتی آب، عمق آب، چگالی و تضعیف لایه رسوبی، نوفه^۳ صوتی و شیب بستر بر کارایی چند پردازشگر میدان تطبیقی را بررسی کردند [۸]. دی اسپین در سال ۱۹۹۹، اثر عدم تطابق عمق‌سنجی^۴ بستر را در دو محیط کم‌عمق، در تحقیق خود مطالعه نمود [۹]. در سال ۲۰۱۶ تولسفن و دوسو، عدم تطابق در عمق آب، شبه‌سنجه‌های زمین‌صوتی^۵ بستر و سرعت صوتی آب را بررسی نمودند [۱۰]. سو و همکاران در سال ۲۰۱۷، اثر عدم تطابق سرعت صوتی بر کارایی روش پردازش میدان تطبیقی در یک محیط کم‌عمق

^۱ Swell

^۲ Internal waves

^۳ Noise

^۴ Bathymetry

^۵ Geoacoustic

^۶ Thermocline

^۷ Range-depth ambiguity surface

$$E^T = (\overline{P_1}, \overline{P_2}, \dots, \overline{P_N}) \quad (3)$$

که

$$\overline{P_n} = \frac{P_n}{\left(\sum_{i=1}^N |P_i|^2 \right)^{1/2}} \quad (4)$$

اکنون، تابع بیشینه- لایکلیهود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$L(z_s, z'_s; r_s, r'_s) = \sqrt{[E^H(R)^{-1}E]} \quad (5)$$

براساس معادله (۵)، می‌توان مشاهده نمود که مقدار تابع بیشینه- لایکلیهود، از محاسبه حاصل ضرب توابع میدان فشار الگوسازی شده P_n (در E) در توابع میدان فشار اندازه‌گیری شده P_n در R تعیین می‌شود. اگر میدان‌های الگوسازی شده و اندازه‌گیری شده در هر هیدروفون، بسیار به یکدیگر مشابه باشند، مقدار مخرج در معادله (۵) کوچک خواهد بود و بنابراین، مقدار L بزرگ می‌گردد. اما، چنانچه عدم تطابق در سرعت صوتی لایه حبایی رخ دهد، یک خطای فاز در مقدار میدان فشار الگوسازی شده در هر هیدروفون پدید می‌آید. در این حالت بین میدان‌های الگوسازی شده و اندازه‌گیری شده، اختلافی رخ می‌دهد که این امر منجر به اثر نامطلوبی بر مقدار L محاسبه شده در معادله (۵) می‌گردد و خطا در مکان‌یابی منبع پدید می‌آید.

۲-۲. الگوی محیطی

الگوی محیطی به کار رفته در این مطالعه، در شکل ۱ نمایش داده شده است. این الگو براساس اطلاعات محیطی یک ناحیه کم‌عمق در جنوب غربی جزیره کیش در خلیج فارس است (شکل ۲)، که مشخصات زمین‌صوتی لایه رسوبی و بستر آن با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی به دست آمده است. این الگوی محیطی، یک الگوی سه لایه است که در آن یک لایه آب ۸۸ متری روی یک لایه رسوب و یک لایه بستر قرار دارد. شبه‌سنجه‌های محیطی در پنج دسته تقسیم‌بندی شده‌اند: شبه‌سنجه‌های هندسی، شبه‌سنجه‌های لایه رسوبی، شبه‌سنجه‌های بستر، شبه‌سنجه سرعت صوتی آب و شبه‌سنجه موج سطحی دریا. شبه‌سنجه‌های هندسی شامل عمق منبع صوتی، عمق آرایه گیرنده هیدروفونی و عمق آب هستند.

میدان تطبیقی بیشینه- لایکلیهود^۱ است. تشریح بیش‌تر این فن را می‌توان در منابع [۱۴، ۲] یافت. در این بخش به طور مختصر کاربرد این فن در مسأله آرایه گیرنده عمودی و منبع زیرآبی تشریح می‌گردد.

با این فرض که میدان فشار صوتی مختلط اندازه‌گیری شده در n -آمین هیدروفون آرایه گیرنده عمودی، ناشی از یک منبع زیرآبی واقع در عمق و برد (z_s, r_s) باشد، برای یک آرایه دارای N هیدروفون، می‌توان یک بردار سطری X^T با طول N تشکیل داد (T نشان‌دهنده عملگر ترانپوز است). عناصر این بردار، میدان‌های فشار اندازه‌گیری شده در همان هیدروفون‌ها هستند. یعنی:

$$X^T = (P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (1)$$

براساس این بردار، می‌توان ماتریس کوواریانس^۲ را تشکیل داد:

$$R = X X^H \quad (2)$$

که H نشان‌دهنده عملگر هرمیشین^۳ است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق، جهت اضافه نمودن نوفه به هیدروفون‌ها، یک میدان نوفه سفید^۴، شبیه‌سازی شده و سپس ماتریس کوواریانس آن با ماتریس کوواریانس R جمع شده است. با این روش، یک مقدار ثابت به هر یک از عنصرهای قطر اصلی ماتریس R اضافه می‌گردد. توان نوفه شبیه‌سازی شده از نسبت علامت به نوفه^۵ موردنظر (۱۰ دسی‌بل) به دست می‌آید. با این روش ساده، یک میدان نوفه ناهمبسته^۶ به مسأله اضافه می‌گردد. این نوع فرض نوفه، هیچ‌گونه تغییری در ساختار صفحه ابهام ایجاد نمی‌نماید. بنابراین، مشخصه‌های محیطی موجب تمامی تغییرات بر صفحه ابهام برد- عمق خواهند بود. اکنون یک بردار سطری دیگر با نام E^T در نظر گرفته می‌شود که عناصر آن (P_n) ، میدان‌های فشار صوتی مختلط ناشی از یک منبع فرضی واقع در عمق و برد (z'_s, r'_s) هستند که در هیدروفون‌ها محاسبه شده‌اند و هم‌چنین با نرم مرتبه دو بهنجار شده گردیده‌اند. بنابراین:

¹ Maximum-Likelihood matched field processor

² Covariance matrix

³ Hermitian

⁴ White noise

⁵ SNR; Signal-to-Noise Ratio

⁶ Uncorrelated

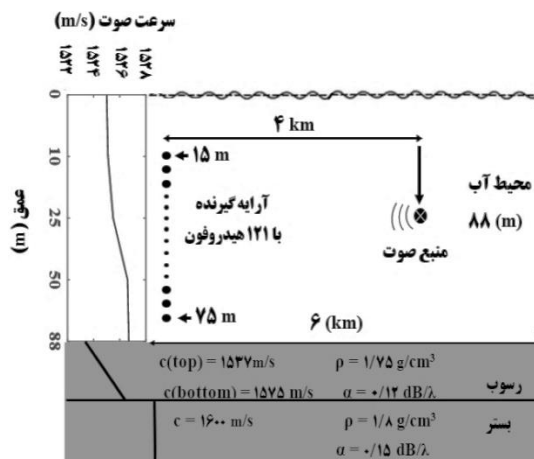
سال ۱۹۹۲ (مقارن با زمان اندازه‌گیری سی‌تی‌دی) با گام زمانی شش ساعته استخراج گردید. مقدار کمینه و بیشینه سرعت باد به ترتیب ۰/۵ و ۱۰/۳ متر بر ثانیه بود. سپس مقادیر سرعت باد در ۱۱ زیردسته با گام ۱ متر بر ثانیه تقسیم‌بندی شد و هر مقدار از سه شبه‌سنجه دیگر بر حسب سرعت باد متناظر خود، در ۱۱ زیر دسته تقسیم‌بندی شدند. سپس برای هر یک از این چهار شبه‌سنجه، مقدار میانگین هر زیر دسته محاسبه گردید. همان‌گونه که در ادامه تشریح می‌گردد، در این تحقیق از اطلاعات باد با سرعت‌های بیش از ۶ متر بر ثانیه و امواج سطحی متناظر آن استفاده شده که در جدول ۱ ارائه گردیده است. مقادیر سرعت باد، جهت محاسبه انحراف سرعت صوتی در لایه حبایی با استفاده از الگوی هال-نووارینی^۴، به کار می‌روند (بخش ۲-۳-۲). شبه‌سنجه‌های موج به عنوان ورودی‌های بسته نرم‌افزاری دابل‌یوای‌اف^۵ (بخش ۲-۳-۱) استفاده شدند تا شکل موج‌های سطح دریا به دست آید.

جدول ۱ مقادیر میانگین سرعت باد و شبه‌سنجه‌های موج سطحی مورد استفاده در این تحقیق در ناحیه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱-۳۱ مارس ۱۹۹۲.

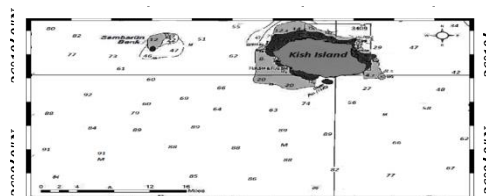
جهت موج (درجه)	ارتفاع موج شاخص (متر)	دوره تناوب موج (ثانیه)	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۲۲۳/۷	۰/۷۲	۳/۷	۶/۶
۲۹۷/۱	۱/۱۳	۴/۶	۷/۵
۲۹۹/۱	۱/۵۲	۵/۶	۸/۶
۲۹۹/۷	۱/۷۱	۵/۶	۹/۴
۲۹۸/۱	۱/۷۶	۵/۶	۱۰/۲

۲-۳. الگوسازی سطح دریا

دو عامل اصلی سطح دریا که در پراکنش سطحی دخیل هستند عبارتند از (۱) امواج سطح دریا به‌عنوان حرکات قائم متناوب سطح دریا (۲) حباب‌های نزدیک سطح دریا ناشی از شکست امواج سطحی. در شکل ۳، طرح‌واره این دو پدیده نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱ الگوی محیطی به کار رفته در این تحقیق شامل شبه‌سنجه‌های آب، لایه رسوبی، بستر و همچنین هندسه منبع صوتی و آرایه گیرنده هیدروفونی.



شکل ۲ ناحیه مورد مطالعه در این تحقیق، در جنوب غربی جزیره کیش در خلیج فارس.

نیم‌رخ سرعت صوتی آب نمایش داده شده در شکل ۱، از اندازه‌گیری سی‌تی‌دی^۱ در ایستگاه اندازه‌گیری شماره ۳۷ گشت دریایی کشتی مونت میشل^۲ در ۱ مارس سال ۱۹۹۲ به دست آمده است [۱۵]. همان‌گونه که می‌توان مشاهده نمود، این نیم‌رخ سرعت صوتی، یک نیم‌رخ زمستانی تقریباً هم‌سرعت است زیرا تغییرات سرعت صوتی از سطح تا بستر دریا، تنها ۱/۸ متر بر ثانیه می‌باشد. اطلاعات باد و موج ناحیه مورد نظر، از بانک داده ای‌سی‌ام‌دابل‌یو‌اف-ای‌آرای این‌تیریم^۳ دریافت شده است [۱۶]. این اطلاعات شامل چهار شبه‌سنجه هستند: سرعت باد در ارتفاع نامی ۱۰ متری (9.1)، ارتفاع موج شاخص (H_{1/3})، جهت موج و دوره تناوب میانگین امواج. این اطلاعات در بازه زمانی ۳۱ روزه از یکم تا سی و یکم مارس

⁴ Hall-Nowarini model

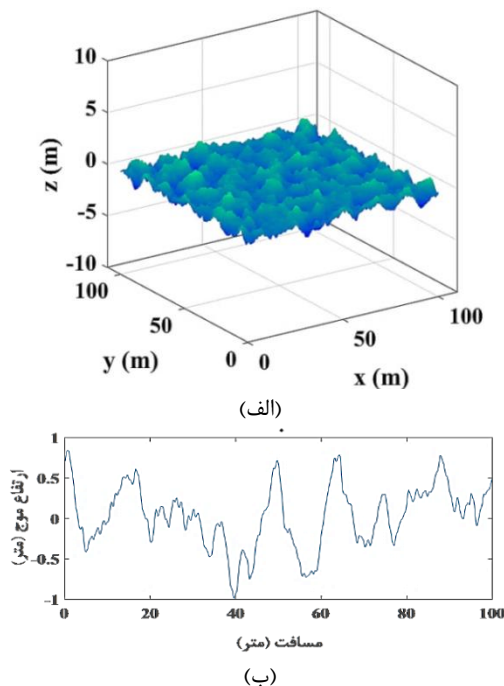
⁵ WAFO; Wave Analysis for Fatigue and Oceanography

¹ CTD; Conductivity-Temperature-Depth

² Mount Mitchell

³ ECMWF-ERA Interim

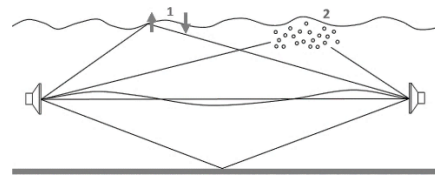
قابل صرف‌نظر هستند. در نتیجه شرایط سطح دریا برای انتشار صوتی زیرآب بین منبع صوتی و آرایه گیرنده، بدون تغییر می‌باشد.



شکل ۴ نمونه‌ای از ساختار شکل موج دریا (الف) دو-بعدی، (ب) یک-بعدی، در حوزه دریایی جزیره کیش در ماه مارس ۱۹۹۲ با استفاده از بسته نرم‌افزاری دابل‌وای‌اف. این شکل موج خاص با استفاده از طیف جی‌ان‌اس دابل‌وای‌پی و ارتفاع مؤثر موج ۱/۵ متر و دوره موج ۵/۶ ثانیه به‌دست آمده است.

۲-۳-۲. الگوسازی اثر حبایها

همان‌گونه که دول و همکاران در ۲۰۱۳ اشاره نمودند [۱۷]، اثرات حبایهای ناشی از باد در لایه نزدیک سطح شامل سه سازوکار فیزیکی هستند: (۱) انکسار پرتوهای صوتی، ناشی از تغییر در نیم‌رخ سرعت صوتی در لایه نزدیک سطح توسط حبایها، (۲) پراکنش، (۳) اطفاء^۲ انتشار همبسته^۳ شامل جذب به اضافه پراکنش. اثر صوتی اصلی حبایهای نزدیک سطح دریا، کاهش قابل توجه سرعت صوتی در لایه نزدیک سطح دریا نسبت به آب بدون حبای زیرلایه حبایی است. بنابراین، حبایهای نزدیک سطح دریا موجب انکسار صوتی به سمت سطح دریا شده و در نتیجه پراکنش سطحی را افزایش می‌دهند.



شکل ۳ نمایش دو عامل اصلی سطح دریا که در پراکنش سطحی دخیل هستند؛ (۱) امواج سطحی دریا (۲) حبایهای نزدیک سطح دریا [۱۷].

ناهمواری سطح دریا ناشی از امواج سطحی می‌تواند موجب پراکنش صوتی زیرآب گردد [۱۷]. پراکنش نیز موجب تغییر فاز میدان فشار صوتی می‌شود. بنابراین، این موضوع یک چالش برای انتشار صوتی زیرآب و کارایی پردازش میدان تطبیقی است.

از دیدگاه صوتی، حبایهای ناشی از باد در نزدیکی سطح دریا، برای سرعت‌های باد بیش از ۶ متر بر ثانیه [۱۷] و در بسامدهای بیش از ۱ کیلوهرتز [۱۸] حائز اهمیت هستند. از این‌رو در این تحقیق، بادهای با سرعت ۶/۶، ۷/۵، ۸/۶، ۹/۴ و ۱۰/۲ متر بر ثانیه و بسامدهای ۲-۱۰ کیلوهرتز انتخاب شدند.

۲-۳-۱. الگوسازی امواج سطحی دریا

در این تحقیق به‌منظور به‌دست آوردن شکل امواج نامنظم سطح دریا، از بسته نرم‌افزاری دابل‌وای‌اف^۱ استفاده شده است [۱۹-۲۰]. با توجه به کوتاه بودن طول موج‌گاه منطقه موردنظر، از طیف جی‌ان‌اس دابل‌وای‌پی^۱ استفاده شده است [۲۱]. پس از ایجاد شکل دو-بعدی امواج سطح دریا (مانند شکل ۴-الف)، نیم‌رخ یک-بعدی سطح دریا بین منبع صوتی و آرایه گیرنده (مانند شکل ۴-ب) استخراج گردید.

جهت اطمینان از اینکه نیم‌رخ موج‌های به‌دست آمده، شرایط آماری امواج سطح دریا را در زمان اندازه‌گیری سی‌تی‌دی پوشش می‌دهند، برای هر یک از سرعت‌های باد سی‌تی‌دی، تعداد ۴۰ عدد نیم‌رخ موج، با گام زمانی یک دهم دوره تناوب موج متناظر با سرعت باد مورد نظر تولید گردید. در این بازه زمانی، می‌توان فرض نمود که تغییرات ارتفاع موج بسیار کوچک بوده و از این‌رو، این تغییرات

^۲ Extinction

^۳ Coherent propagation

^۱ JONSWAP

است.

$J(0)$ یک مقدار ثابت برابر با:

$$J(0) = 1,275 \times 10^{-16} \text{ m}^4$$

$L(\theta)$ عاملی است موسوم به ای-فُلدینگ دیستنس^۳ که عبارتست از فاصله‌ای که مقدار متغیر نمایی با ضریب e (۲/۷۱۸) افزایش یا کاهش می‌یابد.

$$L(\theta) = \begin{cases} 0.4 \text{ m} & \theta \leq 7.5 \text{ m/s} \\ 0.4 \text{ m} + 0.115(\theta - 7.5) & \theta > 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (9)$$

$$J(z) = \frac{4}{3} \pi a_{\text{ref}}^3(z) \left\{ \ln \frac{a_{\text{ref}}(z)}{a_{\text{min}}} + \frac{1 - \left[\frac{a_{\text{ref}}(z)}{a_{\text{max}}} \right]^{x(z)-4}}{x(z)-4} \right\} \quad (10)$$

که

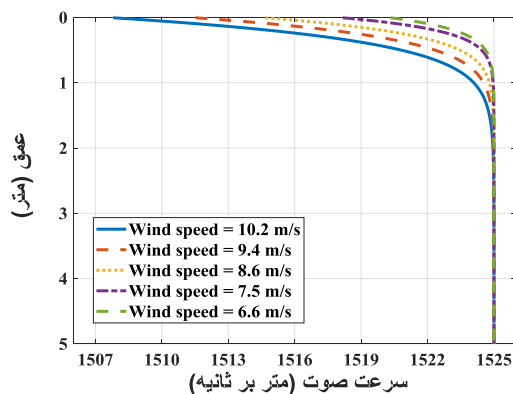
$$a_{\text{ref}}(z) = 54.4 \times 10^{-6} + 1.984 \times 10^{-6} z \text{ (m)}$$

$$a_{\text{min}} = 10 \times 10^{-6} \text{ (} 10 \mu\text{m)},$$

$$a_{\text{max}} = 1000 \times 10^{-6} \text{ (} 1000 \mu\text{m)},$$

$$x(z) = 4.37 + (z / 2.55)^2$$

در این تحقیق، مقادیر عددی استفاده‌شده برای محاسبه c_m عبارت‌تند از: $\rho_w = 1027 \text{ kg/m}^3$ ، $P = 101.3 \text{ kPa}$ ، $C_w = 1525 \text{ m/s}$ ؛ با استفاده از معادله (۶) و مقادیر C_w ، ρ_w و P در بالا، نیم‌رخ‌های سرعت صوتی در لایه حبایی برای سرعت‌های باد مورد نظر در این تحقیق به‌دست آمد. شکل ۵، این نیم‌رخ‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نیم‌رخ‌های سرعت صوتی در لایه حبایی تا عمق ده متر به ازای سرعت‌های باد^۴ مختلف مورد نظر در این تحقیق.

در واقع، حباب‌ها مانند یک لنز صوتی عمل می‌کنند [۲۲].

شایان ذکر است که در این تحقیق، از اثر اطفاء صرف نظر شده است زیرا در بسامدهای مورد نظر، انکسار صوتی نسبت به اطفاء مهم‌تر است [۱۷].

جهت تعیین میزان انحراف سرعت صوتی در لایه حبایی نزدیک سطح، در این تحقیق از نسخه اصلاح‌شده الگوی تجمع حباب هال-نووارینی (اچ‌ان)^۱ استفاده شده است که آینسلی در سال ۲۰۰۵ ارائه نمود [۲۲]. در الگوی اچ‌ان فرض می‌شود که شعاع حباب‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر هستند.

طبق تحلیل‌های آینسلی در سال ۲۰۰۵ [۲۲]، مقدار سرعت صوتی در لایه حبایی $c_m(z)$ در مقایسه با آب بدون حباب، از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$\left[\frac{c_w(z)}{c_m(z)} \right]^2 = 1 + \frac{\rho_w [c_w(z)]^2}{\kappa_c(z) P(z)} U(z) \quad (6)$$

که $U(z)$ مقدار حجم هوای آب دریا در عمق z است که از رابطه ۷ به‌دست می‌آید. $c_w(z)$ برحسب متر بر ثانیه، سرعت صوتی در آب دریای بدون حباب به‌عنوان تابعی از عمق z ، چگالی آب دریای بدون حباب در واحد کیلوگرم بر متر مکعب و $P(z)$ فشار هیدرواستاتیک مطلق بر حسب پاسکال در عمق z است که مجموع فشار اتمسفر (P) و فشار هیدرواستاتیک در عمق z می‌باشد. $\kappa_c(z)$ شاخص پلی‌تروپیک^۲ برای حباب‌ها در عمق z است که مقدار آن در شرایط هم‌دما و شرایط بی‌دررو، به‌ترتیب برابر با ۱ و ۱/۴ می‌باشد. در این تحقیق، شرایط هم‌دما در نظر گرفته شده است. $c_m(z)$ بر حسب متر بر ثانیه، سرعت صوتی در لایه حبایی در عمق z می‌باشد.

$$U(z) = \frac{U(0)}{J(0)} e^{-\frac{z}{L(\theta) J(z)}} \quad (7)$$

$U(0)$ حجم هوای سطحی است:

$$U(0) = U_1 \left(\frac{\theta_1}{10 \text{ m/s}} \right)^3 \quad (8)$$

که شبه‌سنجه بی‌بعد U_1 ، حجم هوای نزدیک سطح برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه بوده و مقدار آن 9.29×10^{-7}

³ E-folding distance

⁴ Wind speed

¹ HN

² Polytropic index

جهت به‌دست آوردن میدان‌های فشار صوتی در شرایط تطابق و عدم‌تطابق، از یک فرایند آماری استفاده شده است. برای هر یک از ۴۰ نیم‌رخ امواج سطحی دریا که در بخش ۲-۳ به‌دست آمد، یک میدان فشار صوتی توسط الگوی انتشار صوتی آرای‌ام‌سورف^۱ تولید گردید [۲۳]. شایان ذکر است که این میدان‌های فشار صوتی، ناشی از منبع صوتی زیرآبی هستند. بنابراین مشخصات منبع صوتی شامل عمق استقرار منبع (Z_s)، فاصله منبع تا آرایه هیدروفونی (r_s) و بسامد منبع (f_s) بخشی از ورودی‌های این الگو هستند. در شکل ۶ در بخش بلوک انتشار صوتی، مشخصات منبع صوتی به عنوان ورودی‌های الگوی انتشار صوتی آرای‌ام‌سورف نشان داده شده است که نقش منبع صوتی در فرایند تولید میدان‌های فشار صوتی در فرایند کلی عملکرد روش پردازش میدان تطبیقی را مشخص می‌کند. برای هر نقطه با مختصات (z_p, r_p) در میدان فشار صوتی مربوط به z -آمین نیم‌رخ امواج سطحی دریا، یک مقدار فشار مختلط $p_j = x_j + iy_j$ وجود دارد. میانگین همبسته ($\overline{p_c}$) مقادیر فشار صوتی، به ازای تمام نیم‌رخ‌ها، به‌صورت زیر محاسبه گردیدند [۲۴]:

$$\overline{p_c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j + i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (11)$$

میدان‌های فشار صوتی میانگین‌گیری شده حاصل، در مراحل بعد توسط پردازش‌گر میدان تطبیقی استفاده می‌شود. برای هر یک از حالت‌های تطابق و عدم‌تطابق، یک صفحه ابهام برد-عمق به‌دست آمد (مانند شکل ۷ و ۸). هر صفحه ابهام دارای بازه برد ۱-۶۰۰۰ متر با گام تفکیک ۵ متر و بازه عمق ۴-۸۸ متر با گام تفکیک ۱ متر است. سپس برای هر صفحه ابهام، ارتفاع قله^۲ اصلی (قله دارای بیش‌ترین ارتفاع) و مقدار میانگین پس‌زمینه محاسبه شد. بر این اساس، مقدار نسبت قله به پس‌زمینه (پی‌بی‌آر)^۳ محاسبه شد. در این تحقیق، پی‌بی‌آر بر حسب دسی‌بل به‌صورت $(\text{Peak}-\mu)/\mu$ ، تعریف شده است [۲] که μ مقدار میانگین پس‌زمینه صفحه ابهام به جز در بازه کوچکی اطراف قله اصلی و ارتفاع آن در صفحه ابهام است.

به‌روشنی می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت باد، انحراف سرعت صوتی در لایه حبابی افزایش می‌یابد. مطابق این شکل، مقدار بیشینه انحراف سرعت صوتی در لایه حبابی ($\Delta C_{\max}$) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مقدار بیشینه انحراف سرعت صوتی در لایه حبابی ($\Delta C_{\max}$) برای سرعت‌های باد مورد نظر در این تحقیق.

سرعت باد (متر بر ثانیه)	مقدار بیشینه انحراف سرعت صوتی (متر بر ثانیه)
۶٫۶	۴٫۷
۷٫۵	۶٫۸
۸٫۶	۱۰٫۳
۹٫۴	۱۳٫۵
۱۰٫۲	۱۷٫۲

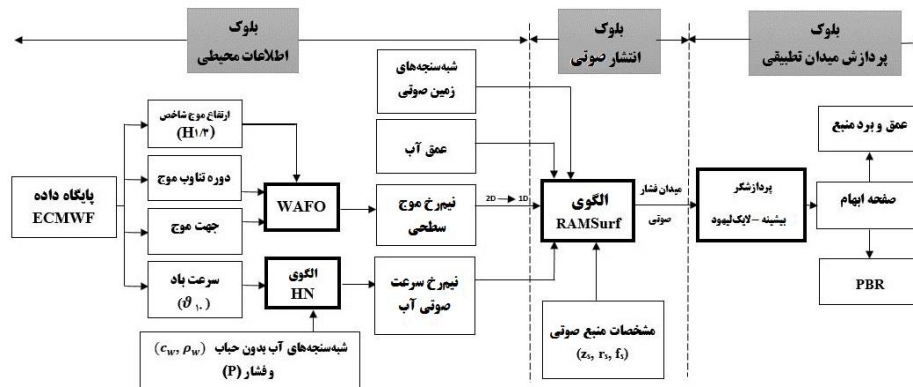
۴-۲. فرایند تحلیل

در این تحقیق، تمرکز بر مکان‌یابی یک منبع صوتی زیرآبی واقع در هر یک از عمق‌های ۱۰، ۴۵ و ۷۵ متر در یک محیط نسبتاً کم‌عمق است (حوزه دریایی جنوب غرب جزیره کیش با عمق ۸۸ متری متناظر با محدوده عمق خلیج فارس در مجاورت تنگه هرمز). فاصله منبع با آرایه گیرنده خطی عمودی، چهار کیلومتر فرض شده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، اثر حباب‌های نزدیک سطح برای بسامدهای بالاتر از ۱ کیلوهرتز، قابل ملاحظه است. بنابراین بسامد منبع، ۲-۱۰ کیلوهرتز با گام ۱ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. آرایه گیرنده هیدروفونی دارای ۱۲۱ هیدروفون با فاصله ۰٫۵ متر از یکدیگر بوده و فرض بر آن است که از عمق ۱۵ تا ۷۵ متری گسترده شده است. یک مقدار نسبتاً بالا (۱۰ دسی‌بل) برای نسبت علامت به نوفه هر یک از هیدروفون‌ها انتخاب گردید تا مکان‌یابی منبع بدون ارتباط با اثر مخرب نوفه مطالعه گردد. اثر حباب‌های ناشی از باد (شرایط عدم‌تطابق)، با لحاظ نمودن انحراف سرعت صوتی ناشی از لایه حبابی، شبیه‌سازی شد و سپس با استفاده از پردازش‌گر میدان تطبیقی بیشینه-لایک‌لیهود، همبستگی این میدان فشار صوتی با میدان فشار صوتی شبیه‌سازی شده بدون اثر حباب (شرایط تطابق)، محاسبه گردید.

¹ RAMSuf

² Peak

³ PBR; Peak-to-Background Ratio



شکل ۶ رهیافت الگوسازی یکپارچه بکار رفته در این تحقیق به همراه اجزای آن و ارتباط بین اجزا.

$$\Delta PBR = PBR_{\text{match}} - PBR_{\text{mismatch}} \quad (۱۳)$$

۵-۲. رهیافت الگوسازی یکپارچه

شکل ۶، رهیافت الگوسازی یکپارچه‌ای را نشان می‌دهد که در این تحقیق جهت بررسی اثر حباب‌های ناشی از باد بر کارایی روش پردازش میدان تطبیقی، به‌کار رفته است. در این شکل کادرها یا جعبه‌های با خط باریک، نشان‌دهنده داده‌ها و خروجی‌ها هستند و جعبه‌های با خط ضخیم، کدهای رایانه‌ای استفاده شده را نشان می‌دهند که جزئیات آن‌ها در بخش‌های قبل ارائه گردید.

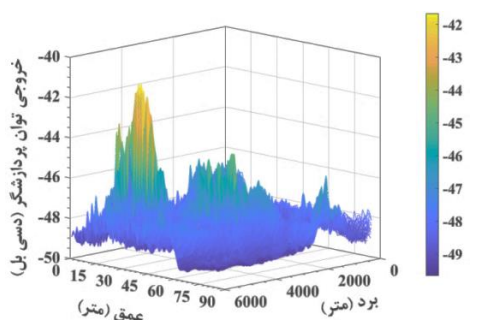
۳. نتایج

برای نمونه، شکل ۷ صفحه‌های ابهام برد-عمق را برای یک حالت تطابق در سه عمق منبع نشان می‌دهد. این صفحه‌های ابهام توسط پردازش گر بیشینه-لایک‌لیهود، برای منبع صوتی زیرآبی با بسامد ۱۰ کیلوهرتز، واقع در هر یک از سه عمق منبع ۱۰، ۴۵ و ۷۵ متر و در فاصله ۴ کیلومتری از یک آرایه گیرنده خطی عمودی، با به‌کارگیری الگوی محیطی ارائه‌شده در شکل ۱ و موج سطحی متناظر با سرعت باد ۱۰/۲ متر بر ثانیه و فرض عدم وجود اثر لایه حبایی تولید شده‌اند. بنابراین، به دلیل تشابه همه شبه‌سنج‌های محیطی، عدم تطابق بین میدان‌های فشار صوتی الگوسازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده وجود ندارد. برای هر حالت، قله اصلی که نشان‌دهنده موقعیت دقیق منبع است، به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از قله‌های ثانویه است. مقدار پی‌بی‌آر محاسبه‌شده روی این صفحه‌ها، بیش از ۳۵ دسی‌بل برای هر سه حالت است.

در این مطالعه، داده‌های الگوسازی شده مربوط به شرایط تطابق، با استفاده از الگوی آرایی‌ام‌سورف و با استفاده از داده‌های الگوی محیطی ارائه شده در شکل ۱، تولید شدند. در شرایط تطابق، نیم‌رخ سرعت صوتی فاقد اثر لایه حبایی است اما امواج سطحی متناظر با سرعت‌های باد موردنظر، در الگوسازی‌ها لحاظ شده‌اند. برای هر حالت تطابق، در هر بسامد موردنظر، یک صفحه ابهام برد-عمق، با اعمال پردازشگر بیشینه-لایک‌لیهود روی میدان‌های الگوسازی‌شده، ایجاد گردید و براساس این صفحه ابهام، یک پی‌بی‌آر محاسبه شد (PBR_{match}).

جهت شبیه‌سازی شرایط عدم تطابق، با استفاده از الگوی آرایی‌ام‌سورف، یک داده اندازه‌گیری‌شده مصنوعی برای هر یک از شش مورد انحراف سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی ارائه‌شده در شکل ۵ ایجاد گردید. نیم‌رخ سرعت صوتی به‌کار رفته در این شرایط، دارای اثر لایه حبایی است. سایر شبه‌سنج‌های محیطی، مشابه شرایط تطابق هستند. برای هر حالت عدم تطابق، در هر بسامد موردنظر، یک صفحه ابهام با اعمال پردازش گر بیشینه-لایک‌لیهود روی میدان‌های الگوسازی‌شده و میدان اندازه‌گیری‌شده مصنوعی ایجاد گردید. سپس برای هر صفحه ابهام، یک پی‌بی‌آر محاسبه گردید (PBR_{mismatch}) و براساس مختصات قله اصلی، یک موقعیت احتمالی حضور منبع بر حسب برد و عمق تخمین زده شد. جهت مقایسه اثر لایه حبایی بر پی‌بی‌آر، برای هر مورد عدم تطابق در یک بسامد معین، اختلاف مقدار پی‌بی‌آر شرایط تطابق و شرایط عدم تطابق که با ΔPBR نشان داده می‌شود، به‌صورت زیر محاسبه گردید:

(یعنی بیشینه انحراف سرعت صوتی ۱۷/۲ متر بر ثانیه در لایه حبایی). در مقایسه با صفحه ابهام ارائه‌شده در شکل ۷-الف، واضح است که در شکل ۸، به‌طور قابل‌توجهی ارتفاع قله اصلی کاهش یافته و شکل این قله، پهن‌تر شده است. بنابراین، پی‌بی‌آر برای سطح ابهام مربوط به حالت عدم‌تطابق مورد نظر، نسبت به حالت تطابق متناظر خود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. هم‌چنین موقعیت قله اصلی نسبت به موقعیت واقعی منبع متفاوت است و از این‌رو خطا در تخمین برد و عمق منبع رخ داده است.



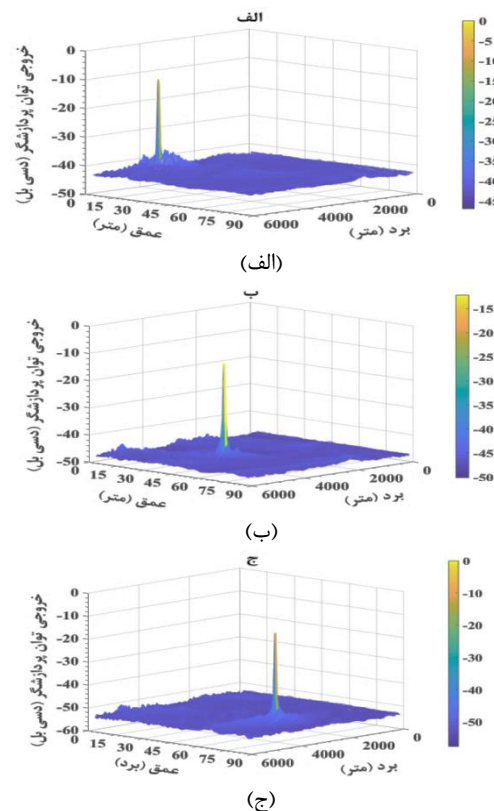
شکل ۸ صفحه ابهام برای یک منبع صوتی ۱۰ کیلوهرتز واقع در عمق ۱۰ متری در یک محیط کم عمق ۸۸ متری در خلیج فارس با در نظر گرفتن شرایط عدم تطابق ناشی از لایه حبایی متناظر با سرعت باد ۱۰/۲ متر بر ثانیه؛ نسبت علامت به نوفه، ۱۰ دسی‌بل است.

جهت ارائه نتایج با جزئیات، ابتدا به بررسی اثر لایه حبایی بر پی‌بی‌آر پرداخته شده است. نتایج در شکل ۹ به عنوان تابعی از عدم‌تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی برای بسامدهای منبع ۲-۱۰ کیلوهرتز ارائه شده است. در این شکل، منبع در هر یک از عمق‌های ۱۰، ۴۵ و ۷۵ متر قرار دارد و انحراف سرعت صوتی متناظر با سرعت باد ۶/۶ متر بر ثانیه تا ۱۰/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

نمادهای چندضلعی نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از فرایند پردازش میدان تطبیقی و منحنی‌های متناظر آن‌ها، منحنی‌های برازش شده^۱ هستند. ΔC_{max} نشان‌دهنده مقدار بیشینه انحراف سرعت صوتی در لایه حبایی است.

جهت مقایسه اثر عمق منبع بر ΔPBR ، شکل ۱۰ ارائه شده است.

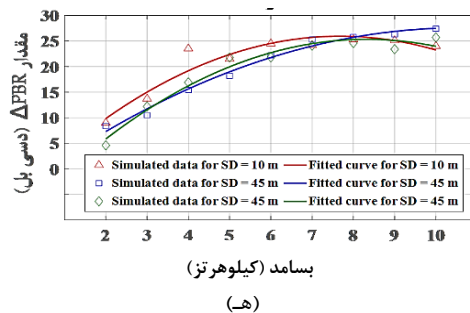
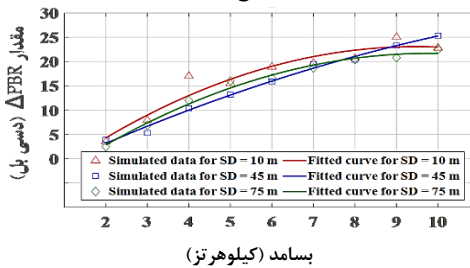
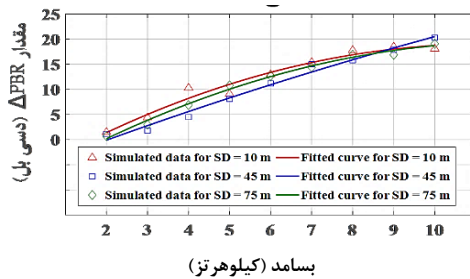
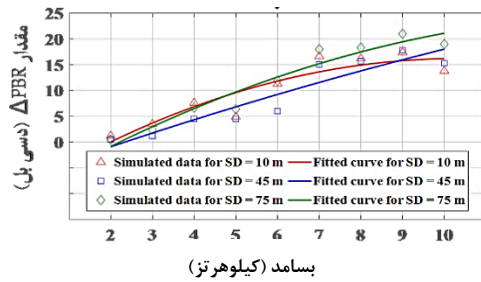
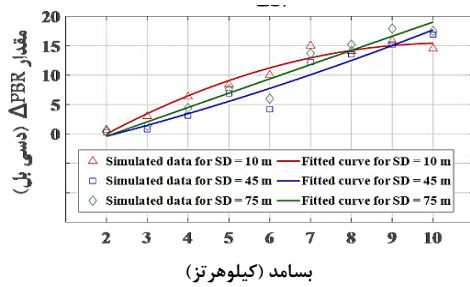
برای دیگر بسامدهای مورد نظر در این تحقیق نیز چنین شرایطی وجود دارد.



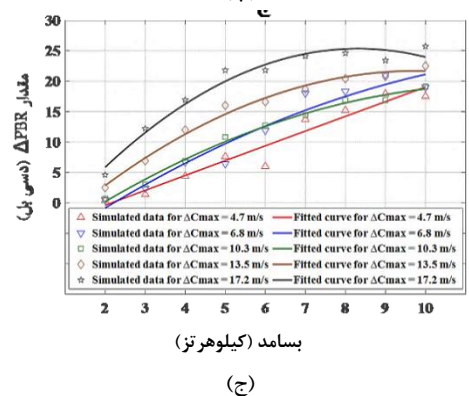
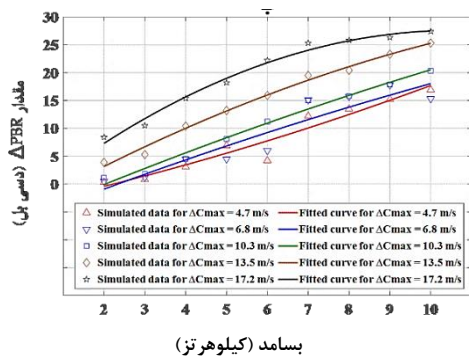
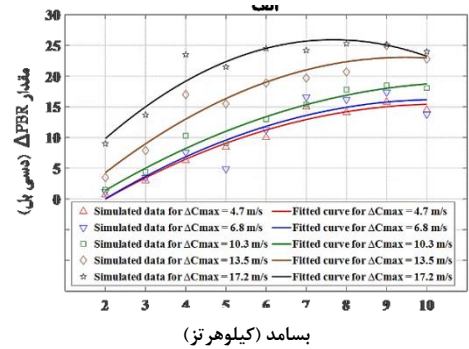
شکل ۷ صفحه ابهام برای یک منبع صوتی ۱۰ کیلوهرتز واقع در عمق (الف) ۱۰ متری، (ب) ۴۵ متری و (ج) ۷۵ متری در یک محیط کم عمق ۸۸ متری در خلیج فارس؛ در شرایط محیطی جهت تولید این صفحه‌های ابهام، عدم‌تطابق وجود نداشته و نسبت علامت به نوفه، ۱۰ دسی‌بل است.

اکنون، نتایج عدم‌تطابق سرعت صوتی ناشی از اثر لایه حبایی ارائه می‌گردد. برای پنج حالت عدم‌تطابق (پنج سرعت باد مورد نظر در جدول ۲ و انحراف سرعت صوتی متناظر آن‌ها) در ۹ بسامد ذکر شده، ۴۵ صفحه ابهام برای هر یک از سه عمق منبع به‌دست آمد و سپس ΔPBR و خطای تخمین برد و عمق منبع متناظر هر حالت عدم‌تطابق محاسبه گردید. برای نمونه، صفحه ابهام برد-عمق برای حالت عدم‌تطابق مربوط به یک منبع ۱۰ کیلوهرتز واقع در عمق ۱۰ متری، در شکل ۸ ارائه شده است. تمام شبه‌سنج‌های محیطی، مشابه شرایط شکل ۷-الف فرض شده‌اند به‌جز نیم‌رخ سرعت صوتی که شامل اثر لایه حبایی متناظر با سرعت باد ۱۰/۲ متر بر ثانیه است

¹ Fitting curve

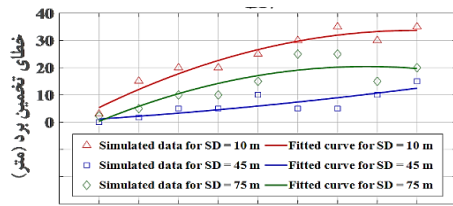


شکل ۱۰ مقدار ΔPBR برحسب دسی‌بل، برای سه عمق منبع ۱۰، ۴۵ و ۷۵ متری در بسامدهای ۱۰-۲ کیلوهرتز؛ نتایج برای یک انحراف سرعت صوتی لایه حبایی با مقدار بیشینه (ΔC_{max})، (الف) ۴/۷ متر بر ثانیه، (ب) ۶/۸ متر بر ثانیه، (ج) ۱۰/۳ متر بر ثانیه، (د) ۱۳/۵ متر بر ثانیه، (ه) ۱۷/۲ متر بر ثانیه ارائه شده‌اند.



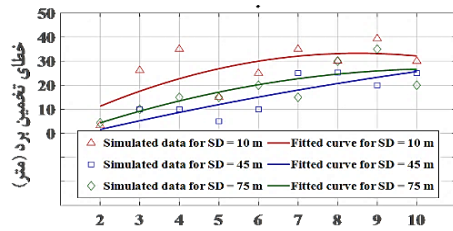
شکل ۹ مقدار ΔPBR برحسب دسی‌بل، به عنوان تابعی از عدم تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی برای بسامد ۱۰-۲ کیلوهرتز، نتایج برای یک منبع صوتی واقع در (الف) ۱۰ متری، (ب) ۴۵ متری و (ج) ۷۵ متری ارائه شده است؛ ΔC_{max} ، بیشینه انحراف سرعت صوتی را نشان می‌دهد، نمادهای چندضلعی نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از فرایند پردازش میدان تطبیقی و منحنی‌های متناظر آن‌ها، منحنی‌های برازش شده هستند.

در ادامه، نتایج خطای تخمین برد منبع ارائه می‌گردد. به‌طور کلی، تحلیل نتایج حاکی از آن است که برای ۴۵ صفحه ابهام به‌دست آمده، در برخی موارد، برد منبع دورتر از مکان واقعی منبع تخمین زده می‌شود (مقدار مثبت خطای برد) و در برخی موارد دیگر، منبع نزدیک‌تر تخمین زده می‌شود (مقدار منفی خطای برد).



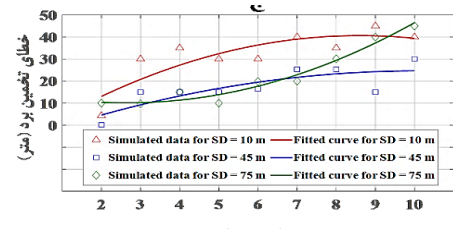
بسامد (کیلوهرتز)

(الف)



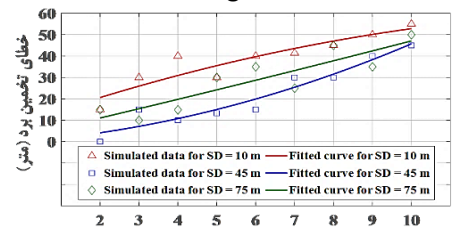
بسامد (کیلوهرتز)

(ب)



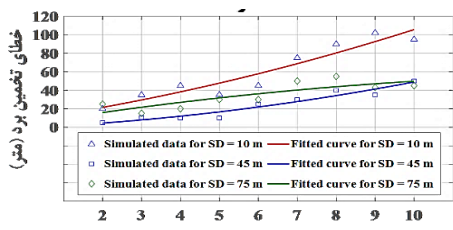
بسامد (کیلوهرتز)

(ج)



بسامد (کیلوهرتز)

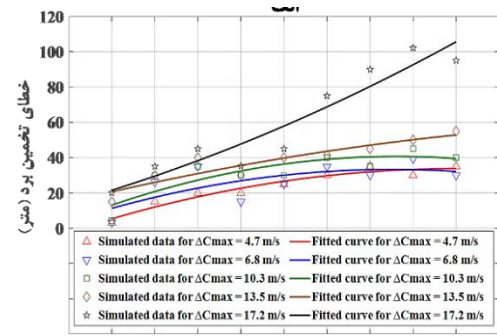
(د)



بسامد (کیلوهرتز)

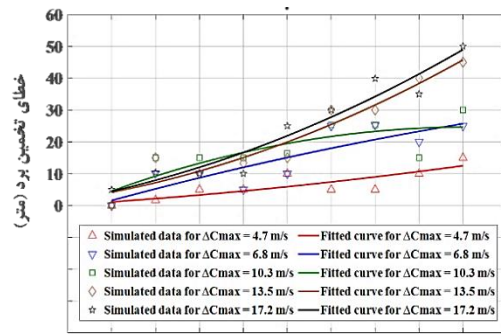
(ه)

شکل ۱۲ خطای برد برای سه عمق منبع ۱۰، ۴۵ و ۷۵ متری در بسامدهای ۲-۱۰ کیلوهرتز، نتایج برای انحراف سرعت صوتی لایه حبایی با مقدار بیشینه (ΔC_{max})، (الف) ۴/۷ متر بر ثانیه، (ب) ۶/۸ متر بر ثانیه، (ج) ۱۰/۳ متر بر ثانیه، (د) ۱۳/۵ متر بر ثانیه، (ه) ۱۷/۲ متر بر ثانیه ارائه شده است. نمادهای چندضلعی نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از فرایند پردازش میدان تطبیقی و منحنی‌های متناظر آن‌ها، منحنی‌های برازش شده هستند.



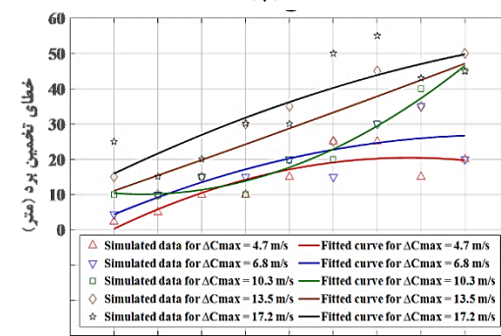
بسامد (کیلوهرتز)

(الف)



بسامد (کیلوهرتز)

(ب)



بسامد (کیلوهرتز)

(ج)

شکل ۱۱ خطای تخمین برد منبع به‌عنوان تابعی از عدم تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی برای بسامدهای ۲-۱۰ کیلوهرتز؛ نتایج برای یک منبع صوتی واقع در (الف) ۱۰ متری، (ب) ۴۵ متری و (ج) ۷۵ متری ارائه شده است، ΔC_{max} بیشینه انحراف سرعت صوتی را نشان می‌دهد. نمادهای چندضلعی نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از فرایند پردازش میدان تطبیقی و منحنی‌های متناظر آن‌ها، منحنی‌های برازش شده هستند.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، مقدار مطلق خطای برد ارائه شده است. در این شکل‌ها، نمادهای چندضلعی نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از فرایند پردازش میدان

۴. بحث

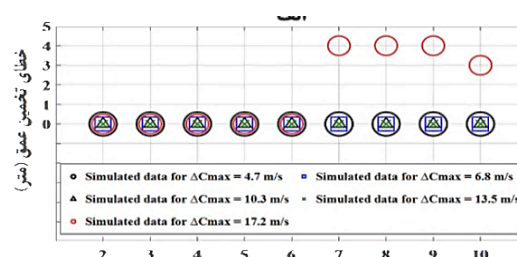
۴-۱. اثر لایه حبایی بر پی‌بی‌آر

مطابق شکل ۹ (مقایسه اثر لایه حبایی بر ΔPBR)، برای هر یک از حالات عمق منبع، بهترین کارایی روش پردازش میدان تطبیقی بر حسب ΔPBR در هر بسامد، در کم‌ترین عدم تطابق به دست می‌آید (یعنی برای کم‌ترین انحراف سرعت صوتی در لایه حبایی) و کارایی با افزایش درجه عدم تطابق، بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش بسامد منبع برای هر حالت عدم تطابق، منجر به کاهش قابل توجه کارایی می‌گردد. همچنین مطابق شکل ۱۰ (مقایسه اثر عمق منبع بر ΔPBR)، وابستگی قابل ملاحظه‌ای میان مقدار ΔPBR و عمق منبع مشاهده نمی‌گردد. بطور کلی، عدم تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی در آب کم عمق، پی‌بی‌آر را کاهش می‌دهد و هنگامی که بسامد منبع یا درجه عدم تطابق و یا هر دو افزایش یابد، این کاهش شدیدتر می‌گردد.

۴-۲. اثر لایه حبایی بر تخمین برد منبع

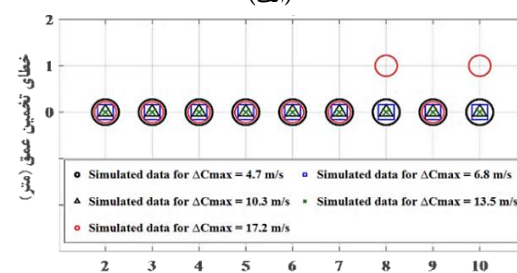
مطابق شکل ۱۱ (نتایج خطای تخمین برد منبع ناشی از اثر لایه حبایی)، مشاهده می‌شود که برای هر عمق منبع، کم‌ترین خطای برد برای هر بسامد، در کم‌ترین میزان عدم تطابق به دست می‌آید و با افزایش عدم تطابق، خطا افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش بسامد برای هر حالت عدم تطابق، خطای برد به طور کلی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که برای عدم تطابق سرعت صوتی به میزان $17/2$ متر بر ثانیه ($1/1$ درصد سرعت صوتی لایه بدون حباب با سرعت 1525 متر بر ثانیه)، بیشینه خطای برد برای محیط مورد مطالعه، 102 متر خواهد بود (حدود $2/5$ درصد برد واقعی منبع). همچنین براساس شکل ۱۲ (مقایسه اثر عمق منبع بر خطای برد)، خطای برد تا حدی به عمق منبع وابسته است. خطای برد برای عمق منبع 10 متری نسبت به دو عمق منبع دیگر که دورتر از سطح دریا هستند، بیش‌تر می‌باشد. دلیل این امر آن است که با نزدیک شدن منبع به سطح دریا، در یک طول ثابت از سطح دریا، تعداد پرتوهای صوتی که با سطح دریا برخورد می‌کنند، بیش‌تر می‌شوند، بنابراین پرتوهای صوتی بیش‌تری دچار پراکنش شده و از این‌رو میدان فشار صوتی

تطبیقی هستند و منحنی‌های متناظر آن‌ها، منحنی‌های برازش شده هستند. شکل ۱۱، تغییرات خطای برد را به عنوان تابعی از عدم تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی برای بسامدهای $2-10$ کیلوهرتز در عمق‌های منبع 45 متر و 75 متر نشان می‌دهد. جهت مقایسه اثر عمق منبع بر خطای برد، شکل ۱۲ ارائه شده است. شکل ۱۳، تغییرات در خطای عمق را به عنوان تابعی از عدم تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی برای منبع صوتی $2-10$ کیلوهرتزی واقع در عمق‌های 10 متر، 45 متر و 75 متری نشان می‌دهد.



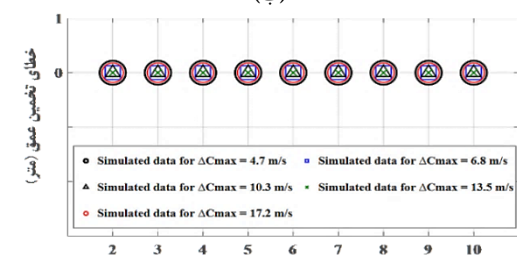
بسامد (کیلوهرتز)

(الف)



بسامد (کیلوهرتز)

(ب)



بسامد (کیلوهرتز)

(ج)

شکل ۱۳ خطای تخمین عمق منبع به عنوان تابعی از عدم تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبایی برای بسامدهای $2-10$ کیلوهرتز؛ نتایج برای یک منبع صوتی واقع در (الف) 10 متری، (ب) 45 متری و (ج) 75 متری ارائه شده است؛ ΔC_{max} ، بیشینه انحراف سرعت صوتی را نشان می‌دهد.

می‌یابد، اما اثر قابل ملاحظه لایه حبابی ناشی از باد بر پردازش میدان تطبیقی، به سه عامل وابسته است: سرعت باد، بسامد منبع و عمق منبع. به‌طوری که در همه سرعت‌های باد و بسامدهای مورد نظر در این تحقیق، اثر این پدیده قابل ملاحظه نیست. در واقع، در بسامدهای بالاتر یا مساوی ۸ کیلوهرتز، برای سرعت‌های باد بیش از ۸ متر بر ثانیه، خطا در مکان‌یابی منبع (خطای تخمین برد و عمق منبع) قابل توجه است، یعنی خطای بیش از یک درصد. هم‌چنین مقدار این خطاها به عمق منبع وابسته است به‌طوری که برای منبع واقع در عمق ۱۰ متری، نسبت به منبع واقع در عمق ۴۵ متر یا ۷۵ متر، خطا بیش‌تر می‌باشد. در مسأله مورد نظر در این تحقیق، درصد بیشینه خطاهای عمق و برد به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۴/۵ درصد هستند. از این‌رو درصد بیشینه خطاهای عمق به‌طور قابل توجهی از درصد بیشینه خطاهای برد بیش‌تر هستند. علت وقوع خطاهای برد و عمق و کاهش پی‌بی‌آر ناشی از لایه حبابی نزدیک سطح آن است که حباب‌های موجود در لایه نزدیک سطح موجب کاهش قابل توجه سرعت صوتی در مخلوط آب-هوا نزدیک سطح دریا نسبت به سرعت صوتی در آب بدون حباب در زیر لایه حبابی می‌شوند (انحراف سرعت صوتی). بنابراین، این حباب‌ها موجب انکسار پرتوهای صوتی به سمت سطح دریا شده و از این‌رو پراکنش سطحی افزایش می‌یابد. بنابراین در میدان فشار صوتی اغتشاش پدید می‌آید و کارایی پردازش میدان تطبیقی کاهش می‌یابد.

نتایج این تحقیق که به روش شبیه‌سازی رایانه‌ای انجام شده است، با نتایج تحقیقات تجربی گذشته که به بررسی تأثیر عدم‌تطابق نیم‌رخ سرعت صوتی پرداخته‌اند (مانند تحقیق فیولید و همکاران، در سال ۱۹۸۹، گینگراس در سال ۱۹۸۹ و پورتر و تولستوی) سازگاری دارد. زیرا در این تحقیق، ایجاد خطا در مکان‌یابی منبع صوتی، ناشی از عدم‌تطابق سرعت صوتی (ناشی از لایه حبابی نزدیک سطح) مشاهده گردید. هم‌چنین تأثیر بسامد و عمق منبع صوتی در میزان خطای مکان‌یابی نیز با نتایج تحقیقات مشابه (مانند تحقیق دلبالزو در سال ۱۹۸۸) مطابقت دارند.

بیش‌تر دچار اغتشاش شده و اختلاف بین میدان فشار الگوسازی شده و اندازه‌گیری شده بیش‌تر می‌گردد. به‌طور کلی، عدم‌تطابق سرعت صوتی ناشی از لایه حبابی در آب کم‌عمق موجب خطای تخمین برد می‌گردد و هنگامی که بسامد منبع یا درجه عدم‌تطابق و یا هر دو افزایش یابد، این خطا شدیدتر می‌گردد.

۳-۴. اثر لایه حبابی بر تخمین عمق منبع

مطابق شکل ۱۳ (مقایسه خطای عمق منبع ناشی از لایه حبابی)، مشاهده می‌شود که خطای عمق، در همه حالت‌های عدم‌تطابق و همه بسامدها رخ نمی‌دهد. این خطا تنها در حالت عدم‌تطابق بیشینه (یعنی $\Delta C_{\max} = 17.2 \text{ m/s}$) و برای بسامدهای بالاتر از ۶ کیلوهرتز رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که ۱/۱ درصد خطا در سرعت صوتی لایه بدون حباب با سرعت ۱۵۲۵ متر بر ثانیه، ۴/۵ درصد خطا در تخمین عمق منبع ایجاد می‌کند. هم‌چنین مقدار خطای عمق منبع به‌طور قابل توجهی وابسته به عمق منبع است. با افزایش عمق منبع، خطای عمق کاهش می‌یابد (به دلیل مشابه ارائه در مورد شکل ۱۲). هم‌چنین مقدار خطای عمق همواره مثبت است، یعنی به علت اثر لایه حبابی، عمق منبع در عمق پائین‌تری نسبت به عمق واقعی منبع تخمین زده می‌شود. دلیل آن است که در عمق‌های پائین‌تر نسبت به سطح دریا، میدان فشار صوتی کم‌تر از لایه حبابی متأثر می‌گردد. از این‌رو میدان فشار صوتی در عمق‌های پائین‌تر، بیش‌تر شبیه به میدان فشار حالت تطابق است و بنابراین، پردازش گر میدان تطبیقی، منبع را در عمق پائین‌تر تخمین می‌زند.

۵. نتیجه‌گیری

در محیط آب کم‌عمق، عدم‌تطابق در نیم‌رخ سرعت صوتی در لایه حبابی نزدیک سطح، موجب خطاهای قابل ملاحظه‌ای در مکان‌یابی یک منبع صوتی زیرآبی به روش پردازش میدان تطبیقی می‌گردد. اگر چه با افزایش درجه عدم‌تطابق یا با افزایش بسامد منبع، خطاهای برد و عمق عموماً افزایش یافته و نسبت قلّه به پس‌زمینه (پی‌بی‌آر) نسبت به حالت تطابق کاهش

۶. تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر امیر اخوان از دانشگاه صنعتی اصفهان که در بخش پردازش علامت، ما را یاری رساندند تقدیر و سپاسگزاری به عمل می‌آورد.

۷. تضاد منافع

این مطالعه تضاد منافع ندارد.

فهرست منابع

- [9] G.L. D'Spain, J.J. Murray, W.S. Hodgkiss, N.O. Booth, P.W. Schey, "Mirages in shallow water matched field processing," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 6, pp. 3245-3265, 1999.
- [10] D. Tollefsen S.E. Dosso, "Source localization with multiple hydrophone arrays via matched-field processing," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 42, no. 3, pp. 654-662, 2016.
- [11] L. Su, L. Ma, S.M. Guo, "Influence of sound speed profile on source localization at different depth," *Journal of Computational Acoustics*, vol. 25, no. 2, pp.1-8, 2017.
- [12] D. Geroski, D. Dowling, "Long-range frequency-difference source localization in the Philippine Sea," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 146, no. 6, pp. 4727-4739, 2019.
- [13] G.F. Byun, H. Akins, K.L. Gemba, H.C. Song, W.A. Kuperman, "Multiple constrain matched-field processing tolerant to array tilte mismatch," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 147, no. 2, pp. 1231-1238, 2020.
- [14] E.R. Kanasewich, "The maximum likelihood method of spectral estimation," In *Time Sequence Analysis in Geophysics*, Alberta, Canada, University of Alberta, pp. 177-183, 1981.
- [15] R.M. Reynolds, "Physical oceanography of the gulf, strait of Hormuz, and the gulf of Oman-results from the Mt Mitchell expedition," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 27, pp. 35-59, 1993.
- [16] D.P. Dee, S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A.J. Geer, L. Haimberger, S.B. Healy, H. Hersbach, E.V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A.P. McNally, B.M. Monge-Sanzf, J.J. Morcrette, B.K. Parkg, C. Peubey, P. Rosnay, de C. Tavolato, J.N. Thepaut, F. Vitart, "The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, pp. 553-597, 2011.
- [17] H.S. Dol, M.E.G.D. Colin, M.A. Ainslie, P.A. van Walree, "Simulation of an underwater acoustic communication channel characterized by wind-generated surface waves and bubbles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 38, no. 9, pp. 642-654, 2013.
- [18] A.D. Jones, A.J. Duncan, A. Maggi, P.A. Clarke, J. Sendt, "Aspects of practical models of acoustic reflection loss at the ocean
- [1] M.B. Porter, R.L. Dicus, R.G. Fizell, "Simulation of matched-field processing in a deep water Pacific environment," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 173-181, 1987.
- [2] D.R. DelBalzo, C. Feuillade, M.M. Rowe, "Effects of water-depth mismatch on matched field localization in shallow water," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, no. 6, pp. 2180-2185, 1988.
- [3] C. Feuillade, D.R. DelBalzo, M.M. Rowe, "Environmental mismatch in shallow-water matched-field processing: Geoacoustic parameter variability," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, no. 6, pp. 2354-2364, 1989.
- [4] D.F. Gingras, "Methods for predicting the sensitivity of matched-field processors to mismatch," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 89, no. 5, pp. 1940-1949, 1989.
- [5] A. Tolstoy, "Investigated sensitivity of matched field processing to sound speed profile for vertical arrays in a deep-water Pacific environment," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, no. 6, pp. 2394-2404, 1989.
- [6] J.R. Daugherty, J.F. Lynch, "Surface wave, internal wave, and source motion effects on matched field processing in a shallow water waveguide," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, no. 6, pp. 2503-2526, 1990.
- [7] H.A. Schmidt, B. Baggeroer, W.A. Kuperman, E.K. Scheer, "Environmentally tolerant beamforming for high-resolution matched field processing: Deterministic mismatch," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88, no. 4, pp. 1851-1862, 1990.
- [8] M.B. Porter, A. Tolstoy, "The matched field processing benchmark problems," *Journal of Computational Acoustics*, vol. 2, no. 3, pp. 161-185, 1994.

- surface,” Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, Sydney, Australia, pp. 267-376, 2010.
- [19] <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo>.
- [20] P.A. Brodtkorb, P. Johannesson, G. Lindgren, I. Rychlik, J. Rydén, E. Sjö, “WAFO-A Matlab toolbox for analysis of random waves and loads,” In Proceedings of 10th International Conference of Offshore Polar Engineering, pp. 343–350, 2000.
- [21] D.E. Hasselmann, M. Dunkel, J.A. Ewing, “Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973,” Journal of Physical Oceanography, vol. 10, no. 8, pp. 1264–1280, 1980.
- [22] M.A. Ainslie, “Effect of wind-generated bubbles on fixed range acoustic attenuation in shallow water at 1–4 kHz,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 118, no. 6, pp. 3513–3523, 2005.
- [23] NRL n.d., <ftp://ftp.ccs.nrl.navy.mil/pub/ram/RAM/>.

(Research Article)

The impact of wind-generated bubble layer on matched field sound source localization in shallow water

V. Zarepour¹, M. Ezam^{*1}, S. Allahyari Beik¹, A. Aliakbari Bidokhti²

1. Department of physical oceanography, Environment faculty, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran

2. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

Received: 2021/07/07, Accepted: 2022/01/14

Abstract

This paper investigates the effect of the wind-generated bubble layer on the underwater sound source localization in the Persian Gulf shallow-water environment through computer simulation and the matched field processing technique. An underwater sound source of 2-10 kHz located at depths of 10, 45, and 75 m was considered at a distance of 4 km from a linear vertical receiver array. The estimation of the source range and depth was performed in the match condition using the maximum-likelihood matched field processor. Next, the errors due to the effect of the sound-speed mismatch of the bubble layer (affected by different wind speeds) were extracted. The results showed that, although errors increased by increasing the degree of the mismatch and by increasing the source frequency, the error values are significant (above 1%) only at frequencies greater than or equal to 8 kHz for wind speeds greater than 8 m/s. Also, the maximum error in estimating the range and depth of the source is 2.5% and 4.5%, respectively. Besides, the values of these errors were dependent on the source depth, so the errors for the sound source located at depth 10 m (closer to the bubble layer) were more than the errors in the other two source depths.

Keywords: Wind-generated bubble layer, Source localization, Mismatch, Range-depth ambiguity surface, Matched field processing.

pp. 61-75 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: ezam@srbiau.ac.