یادداشت فنی

شناسایی جریان‌های زیردریایی توسط امواج صوتی

رهام انصاری مهر[۱*]، سید حمیدرضا رئیس السادات[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشگاه اصفهان؛ rohammehr@gmail.com
[۲] استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی شهرضا؛ shrr300@iaush.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
برش‌نگاری
موج صوتی
زمان پیمایش
شدت جریان
چشمه- گیرنده

چکیده

موج صوتی به‌خوبی در آب انتشار می‌یابد، درحالی‌که بیش‌تر موج‌های الکترومغناطیسی، به‌ویژه در آب‌های شور و چگال دریا، پس از چند ده یا چند صد متر چنان افت می‌کنند که دیگر امکان ردیابی و آشکارسازی آن‌ها وجود ندارد. در این مقاله، با استفاده از امواج صوتی، روش ویژه‌ای برای شناسایی جریان‌های احتمالی زیر آبی و بازسازی شدت، پهنا، و راستای آن‌ها مطرح می‌شود. این روش بر پایه‌ی تفاوت میان زمان‌های پیمایش صوت در مکان‌هایی است که چگالی آب یک مکان با مکان دیگر تفاوت دارد. طراحی کار بر اساس دستگاه «چشمه- گیرنده‌ی صوتی چرخان» است. این تکنیک تا اندازه‌ای با روش‌های مرسوم بازسازی تصویر در برش‌نگاری تشخیصی شباهت دارد. بر این پایه، برنامه‌ای کامپیوتری، به زبان Visual C در محیط ویندوز، نوشته و با شبیه‌سازی یک ناحیه‌ی برش‌نگاشتی اقیانوسی و جریان‌های فرضی موجود در آن، کارایی و صحت برنامه سنجیده می‌شود.

Detection of Under Marine Currents by Acoustic Waves

Roham Ansarimehr [1*], S.Hamidreza Reissosadat [2]

[1] PhD Candidate, University of Isfahan; *rohammehr@gmail.com*
[2] Assistant Professor, Islamic Azad University of Shahreza; *shrr033@iaush.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 8 Mar. 2014
Accepted: 4 Aug. 2014
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
Tomography
acoustic wave
travel time
current intensity
source-receiver

ABSTRACT

Acoustic wave propagates properly in water, whilst most forms of electromagnetic waves, particularly in salty and dense sea water, are attenuated after a few tens or hundreds of meters so that it will be impossible to trace and detect them. This paper presents a special method for recognizing probable underwater currents, and reconstruction of their intensities, widths, and directions by using the acoustic waves. The method relies on the differences in travel times of sound in the locations where the water density varies from one place to another. The design is based on the "rotating sound source-receiver" system. This technique is somehow similar to the customary methods of image reconstruction in diagnostic tomography. A computer program was written in Visual C in the Windows media. The efficiency and accuracy of the program was consequently evaluated by simulating an ocean tomographic region and its postulated currents.

۱- مقدمه

برش‌نگاری بر پایه‌ی امواج صوتی، بیش از سی سال پیش همچون ابزاری برای مشاهده‌ی نواحی درونی دریا معرفی شد [۱] و پس از آن به‌سرعت در میان اقیانوس‌شناسان و صوت‌شناسان در حوزه‌های اقیانوس‌شناسی و فناوری دریایی مطرح و به‌کار گرفته شد. راه‌کار اولیه‌ی این نوع از برش‌نگاری بر پایه‌ی اندازه‌گیری دقیق زمان پیمایش در راستای مسیر پرتوهای صوتی استوار بود. بدین‌ترتیب که زمان‌های پیمایش پالس‌های صوتی میان چشمه و گیرنده اندازه‌گیری می‌شد. این زمان‌ها را می‌توان از روی زمان و زاویه‌ی دریافت پالس‌ها در آرایه‌ای از گیرنده‌های افقی یا عمودی که در زیر دریا آرایش یافته‌اند، از یکدیگر تفکیک کرد، از این‌رو رعایت زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.5.0]

دقیق و جهت‌یابی ابزار سنجش در آن الزامی است. از آن‌جا که سرعت صوت تابع دما یا جریان است، تغییرات اندازه‌گیری‌شده در زمان پیمایش نیز میزانی از تغییرات در دما یا جریان‌های موجود در مسیر پرتو را نشان می‌دهد. مسیرهای پرتو ممکن است بسیار زیاد باشد و این تکنیک درمجموع یک اندازه‌گیری میانگین از دما و جریان فراهم می‌سازد [۲].

چنان‌که می‌دانیم، موج صوتی به‌خوبی در آب انتشار می‌یابد، درحالی‌که بیش‌تر موج‌های الکترومغناطیسی، مانند نور یا موج‌های رادیویی کوتاه، به‌ویژه در آب‌های شور و چگال، پس از چند ده یا چند صد متر چنان افت می‌کنند که دیگر امکان ردیابی و آشکارسازی آن‌ها وجود ندارد. در قیاس، صوت در دریاها و اقیانوس‌ها به‌سادگی انتشار می‌یابد و افت بسیار کم‌تری دارد. درکل، سرعت موج صوتی در دریا تابعی افزاینده از سه کمیت دما، شوری (چگالی)، و فشار (یا عمق) آب است. با افزایش فشار و افزایش دما سرعت صوت افزایش می‌یابد، اما حساسیت سرعت صوت به شوری آب کم‌تر از دما یا فشار است. دما در نواحی سطحی دریا گرم‌تر است و در عمق ۲۰۰ تا ۷۰۰ متری به‌سرعت افت می‌کند. از این‌رو در این ناحیه سرعت صوت بسیار کم‌تر می‌شود. و اما در زیر این ناحیه، دمای دریا با آهنگ بسیار آهسته‌ای کاهش می‌یابد و درعمل می‌توان سرعت صوت را تنها تابع فشار به‌شمار آورد [۳]. بدین‌ترتیب، بسته به آن‌که کدام ناحیه و کدام عمق از دریا مورد بررسی قرار گیرد، با اندازه‌گیری سرعت صوت، یا زمان پیمایش پرتو صوتی، می‌توان ساختار فیزیکی مورد نظر (مانند دما، فشار، و شدت جریان‌های دریایی) را در نواحی مختلف دریا بازسازی کرد.

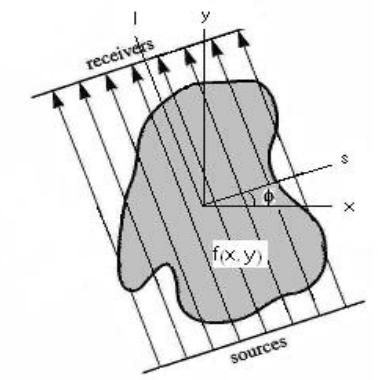
هنگامی‌که موج صوتی در عمق دریا نفوذ می‌کند و سپس به بستر دریا می‌تابد، بخشی از انرژی آن در بستر (کف) دریا نفوذ می‌کند. میزان انرژی که درون کف انتشار می‌یابد در اساس وابسته است به فرکانس صوت، ترکیب کف دریا و زاویه‌ی برخورد. به‌طور سردستی، برای یک کف دریای نمونه‌وار (بدون گاز و ساخته‌شده از سازه‌های نرم)، فرکانس‌های بالای ۱۰ کیلو تا ۱۲ کیلوهرتز بازتاب می‌یابند. فرکانس‌های صوتی ۱ کیلو تا ۱۰ کیلوهرتز چندین متر، و فرکانس‌های ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز ده‌ها متر یا بیش‌تر در بستر دریا نفوذ می‌کنند. بر این اساس، برای هدف‌های تصویرسازی دریا، به‌طور معمول سونارهای با فرکانس ۱۰۰ تا ۵۰۰ هرتز به‌کار گرفته می‌شود. در این فرکانس‌ها، صوت بازتاب اندکی دارد و در عمل تا هزاران متر در عمق دریا نفوذ می‌کند [۴].

در این مقاله، توجه بر «جریان‌های دریایی» و بازسازی شدت، جهت، و پهنای آن‌ها است. طراحی کار بر اساس دستگاه «چشمه-گیرنده‌ی صوتی چرخان» است. این روش تا اندازه‌ای با روش‌های مرسوم برش‌نگاری تشخیصی (در کاربردهای فنی و آسیب‌شناختی) شباهت دارد. در بخش‌های بعد شیوه‌ی طراحی و اجرای کار بیان می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- چشمه-گیرنده‌ی چرخان

با نگاه به شکل ۱، تصور کنیم که پرتوهای صوتی به صورت خط‌های راست میان چشمه و گیرنده باشند. به این معنا که چشمه باریکه‌ای از پرتوهای موازی را از میان برش $f(x, y)$ به یک صفحه‌ی گیرنده می‌تاباند. در شکل راستای چشمه و گیرنده نسبت به دستگاه مختصات، زاویه‌ی φ را می‌سازد. ولی دستگاه چشمه-گیرنده به دور برش مورد نظر در حال چرخش است، به‌گونه‌ای که $0 \le \varphi \le \pi$.



شکل۱- چشمه- گیرنده‌ی چرخان [۵].

درعمل، این وضع را می‌توان توسط یک کشتی متحرک در اطراف ناحیه‌ی مورد بررسی پدید آورد. حال بار دیگر به شکل ۱ توجه کنیم. با دقت به هندسه‌ی شکل، می‌توان زمان پیمایش τ را به صورت زیر نوشت [۵]:

$$\tau(s,\varphi) = \int_{source}^{reciever} dl\, f(s\cos\varphi - l\sin\varphi, s\sin\varphi + l\cos\varphi) \quad (۱)$$

که در آن s و l مختصه‌های چرخش‌یافته هستند و زمان پیمایش τ با انتگرال‌گیری در راستای خط‌های موازی l در همه‌ی زاویه‌های $0 \le \varphi \le \pi$ برآورد می‌شود. در مبحث بازسازی تصویر تابعی نظیر بالا به نام افکنش موازی خوانده می‌شود. برای تبدیل وارون معادله‌ی ۱ و بازیابی $f(x,y)$، الگوریتم‌های چندی پیشنهاد شده است، از جمله روش‌های موسوم به پس‌افکنش [۶] که در این‌جا نیز در بخش بازسازی تصویر نمونه‌ای از همین روش‌ها به‌کار خواهد رفت.

۲-۲- انتخاب ناحیه، و فرض‌های آغازین

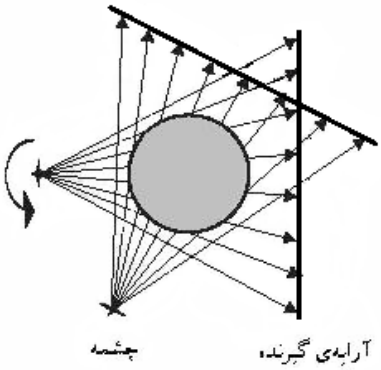
برای اجرای کار، ابتدا باید وسعت ناحیه‌ی مورد بررسی و عمق آن در زیر آب مشخص شود. سطح ناحیه، بسته به نیاز، ممکن است به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.5.0]

وسعت ده‌ها یا صدها کیلومتر در زیر آب باشد. البته آزمایش در عمق ثابتی صورت می‌گیرد. به بیان دیگر، چشمه و گیرنده‌ی صوتی همواره در یک سطح قرار می‌گیرند. چشمه از خود پرتو صوتی می‌فرستد (برای نمونه، با فرکانس ۵۰۰ هرتز) و پس از دریافت یک پالس و ثبت زمان پیمایش توسط گیرنده، دستگاه چشمه-گیرنده در عرض ناحیه‌ی مورد نظر بر یک خط راست حرکت می‌کند و به فواصل دلخواه، ارسال و دریافت پالس و ثبت زمان تکرار می‌شود (اگر سرعت صوت میانگین در عمق مورد نظر ۱۵۰۰ متر بر ثانیه باشد، برای فاصله‌ی ۱۰۰ کیلومتری میان چشمه و گیرنده، ۶۶ تا ۶۷ ثانیه طول می‌کشد تا یک پالس ثبت شود).

راه دیگر آن است که چندین گیرنده را به فواصل دلخواه بر یک خط راست، که پهنای ناحیه را پوشش دهد، قرار داد؛ چنان‌که می‌دانیم، انتشار صوت در همه‌ی راستاهای فضایی صورت می‌گیرد. از این‌رو می‌توان، مطابق شکل ۲، پرتوهایی را که همزمان به‌صورت واگرا از چشمه تابش می‌شوند در آرایه‌ای از گیرنده‌های ثابت واقع بر یک خط راست ثبت کرد (همچنین می‌توان تدبیری اندیشید و تنها از یک گیرنده‌ی متحرک بر خط راست بهره گرفت). در این صورت نیازی به حرکت عرضی دستگاه چشمه-گیرنده نیست. روشن است که در این حالت فاصله‌ی چشمه با گیرنده‌های مختلف یکسان نیست و درنتیجه در آب‌های همگن زمان‌های پیمایش ثبت‌شده در راستاهای مختلف با یکدیگر تفاوت پیدا می‌کند. در برنامه‌ی بازسازی، می‌توان زمان پیمایش صوت برای یک زوج چشمه- گیرنده‌ی خاص، برای مثال، زوج چشمه- گیرنده‌ی میانی، را زمان معیار در نظر گرفت و زمان پیمایش صوت برای چشمه- گیرنده‌های دیگر را، به نسبت فاصله‌ی چشمه با این گیرنده‌ها، برآورد مجدد کرد.



شکل۲- دستگاه چشمه- گیرنده‌ی چرخان (پرتوهای واگرا).

هر کدام از آرایش‌های یادشده را که برگزینیم، لازم است که عمل اندازه‌گیری در زوایای گوناگون، از ۰ تا ۱۸۰ درجه، ادامه یابد. به لحاظ نظری، می‌توان با سه یا چهار زاویه کار را به پایان رساند، ولی هرچه شمار زوایای اندازه‌گیری بیش‌تر باشد، گسسته‌سازی بهتری صورت می‌گیرد و تصویر برش‌نگاشتی دقیق‌تر خواهد شد.

۲-۳- ذخیره‌ی داده‌ها، و فواصل نمونه‌بندی

مرکز ناحیه یا دایره‌ی برش‌نگاشتی را مبدأ مختصات می‌گیریم، و در صفحه‌ی افقی دو محور فرضی ثابت x و y را نشان‌گذاری می‌کنیم. در هر زاویه‌ای که آزمایش صورت می‌گیرد، مکان چشمه و گیرنده در این دستگاه مختصات فرضی باید به‌خوبی مشخص باشد. چون در این کار داده‌های ثبت‌شده همانا زمان‌های پیمایش صوت از چشمه به گیرنده است، فاصله‌ی چشمه با هرکدام از گیرنده‌ها در طول اجرای کار همواره باید مشخص باشد. داده‌ها (زمان‌های پیمایش) را می‌توان در تابعی به‌نام پرتونگاشت ذخیره کرد که در برنامه‌ی کامپیوتری به صورت آرایه‌ی دوبعدی $s(i, j)$ تعریف می‌شود. اگر N_φ را شمار زاویه‌های سمتی و N_s را شمار نمونه‌های شعاعی در راستای یک خط پاسخ (مسیر پیمایش پرتو) بگیریم، i از 1 تا N_φ و j از 1 تا N_s تغییر می‌کنند. زاویه‌ی φ درواقع زاویه‌ای است که خط واصل چشمه و هر گیرنده با محور قراردادی x می‌سازد، و s از فرمول زیر (با توجه به شکل ۱ و معادله‌ی ۱) برآورد می‌شود:

$$s = x\cos\varphi + y\sin\varphi \qquad (۲)$$

که در آن (x,y) مختصات چشمه است.

در فرایند اندازه‌گیری، شمار زاویه‌های سمتی N_φ چه‌بسا زیاد باشد، ولی در کار برنامه‌نویسی که گسسته‌سازی صورت می‌گیرد به همه‌ی آن‌ها نیازی نیست. با وجود این، N_φ باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که امکان تفکیک فضایی بایسته فراهم شود. در این زمینه فرمول‌های مشخصی وجود دارد؛ اگر هر پرتونگاشت $2q+1$ انتگرال خطی را در بر بگیرد، مقدار بهینه‌ی q، برای آن‌که خطای بازسازی کمینه شود، از فرمول $q \sim \frac{N_\varphi}{\pi}$ پیروی می‌کند [۶]. در این مقدار نمودار خطا به حد اشباع می‌رسد و افزودن بر مقدار q اثر چندانی در فرآیند بازسازی نمی‌گذارد. همچنین، هرچه q از مقدار بهینه کم‌تر شود خطای بازسازی بیش‌تر خواهد شد. از سوی دیگر، برای برآورد q باید تفکیک فضایی (در اینجا تفکیک شعاعی) مورد نیازمان را مشخص کنیم (دقت کنیم که در برش‌نگاری زیر آب، برخلاف برش‌نگاری تشخیصی پزشکی، فاصله‌های بررسی سامانه بسیار بزرگ و از رده‌ی ده‌ها یا حتی صدها کیلومتر است. جریان‌های زیر آبی نیز به‌طور معمول چندین کیلومتر پهنا دارند. این جریان‌ها ممکن است کیلومترها در زیر آب جریان یابند، آن‌گاه پهنا، سرعت، یا جهت‌شان تغییر کند). در این برنامه، به دلایل محاسبه‌ای، شمار فاصله‌های شعاعی ۸۱ در نظر گرفته شده است

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.5.0]

(که برای میدان دید *100* کیلومتر، تفکیک فضایی *1.125* کیلومتر را فراهم می‌سازد). در این‌صورت شمار فاصله‌های زاویه‌ای بهینه‌ی N_φ این‌گونه برآورد می‌شود:

$$81 = 2q + 1 \Rightarrow \pi q \sim N_\varphi = 126 \qquad (۳)$$

۲-۴- الگوریتم بازسازی

برنامه‌ی بازسازی از داده‌های ثبت شده، یعنی زمان‌های پیمایش پرتو از چشمه تا گیرنده در هر یک از راستاهای اندازه‌گیری‌شده، استفاده می‌کند و با پردازش داده‌ها تصویر برش مورد نظر را بر صفحه‌ی رایانه نشان می‌دهد. در بازسازی تصویر، درصورتی‌که از الگوریتم‌های تحلیلی نظیر الگوریتم‌های پس‌افکنش استفاده شود، لازم است که داده‌های اندازه‌گیری (افکنش‌ها یا پرتونگاشت‌ها) پالایش یابد. علت آن است که عمل پس‌افکنش به لحاظ ریاضی موجب پیچش تابع پرتونگاشت با تابع پخش نقطه‌ای سیستم می‌شود [۷]. این پیچش در عمل موجب مات شدن تصویر بازسازی‌شده می‌شود. پالایه‌ی بازسازی به لحاظ ریاضی تابعی است که خود با تابع پس‌افکنش پیچش می‌یابد تا شکل درست تصویر (بدون مات‌شدگی) فراهم آید. پالایش را می‌توان به‌دلخواه قبل و یا بعد از عمل پس‌افکنش انجام داد. در این برنامه پالایش در گام اول و آن هم در فضای فرکانسی انجام می‌شود؛ پالایه در فضای فرکانسی شکل ساده‌ی تابع شیب را دارد، ضمن آن‌که، به لحاظ محاسبه‌ای، با تبدیل‌های سریع فوریه[1] رفت و برگشت میان دو فضای فرکانسی و فضای مختصاتی به‌سرعت صورت می‌گیرد (البته مسائل وابسته به الحاق صفرها و رساندن شمار نمونه‌های شعاعی به عدد مناسب برای اجرای الگوریتم سریع فوریه، و نیز بهره‌گیری از یک تابع پنجره‌ی مناسب برای کاستن اثر نوفه در فرکانس‌های بالا، را باید در نظر گرفت) [۸].

گام بعدی در الگوریتم بازسازی، پس‌افکنش است؛ یک نقطه‌ی *(x,y)* در میدان دید برش‌نگاشتی ممکن است در چندین پرتونگاشت مختلف ثبت شده باشد. هرگاه همه‌ی پرتونگاشت‌هایی را که از این نقطه می‌گذرند با هم جمع کنیم، جمع به‌دست آمده بیان‌گر ویژگی آن نقطه است (در این بحث منظور از ویژگی نقطه آن است که آیا از آن جریانی می‌گذرد یا نه). این کار همان پس‌افکنش نام دارد. چون در این برنامه پالایش پیش از پس‌افکنش انجام می‌شود، در این گام کافی است که بر روی پرتونگاشت‌های (افکنش‌های) پالایش‌شده‌ی τ^P در همه‌ی زاویه‌های سمتی انتگرال بگیریم تا تصویر بازسازی‌شده‌ی f^R به‌دست آید:

$$f^R(x,y) = \int_0^\pi \tau^P(s,\varphi)d\varphi \qquad (۴)$$

برای اجرای گسسته‌ی انتگرال بالا، ابتدا باید به‌ازای هر نقطه‌ی *(x,y)* از فضای مختصاتی، مقدار s برای هر جهت (زاویه‌ی) φ از معادله‌ی ۲ برآورد شود، آن‌گاه بر روی آرایه‌ی پرتونگاشت در راستای s درونیابی صورت گیرد، زیرا یک مقدار خاص s که از معادله‌ی ۲ برآورد می‌شود، در حالت کلی با نمونه‌ی گسسته‌ی آن در آرایه‌ی پرتونگاشت برابر نیست. روش درون‌یابی برنامه به این صورت است که مقدار پرتونگاشت با توجه به فاصله‌ی s از دو نقطه‌ی متوالی s_j و s_{j+1} تخمین زده می‌شود:

$$\tau = \frac{(s_{j+1} - s)\tau_j}{\Delta s} + \frac{(s - s_j)\tau_{j+1}}{\Delta s} \qquad (۵)$$

سپس این مقدار به عضو متناظر آن در آرایه‌ی تصویر افزوده می‌گردد.

در صورتی که دریا در عمق مورد نظر همگن باشد، به بیان دیگر، هیچ جریان زیرسطحی در آن عمق موجود نباشد، تصویر به نمایش‌درآمده یکدست است (به‌طور معمول، رنگ خاکستری) و هیچ فراز و نشیبی در آن دیده نمی‌شود. اما در صورت وجود جریان، چگالی آب در آن ناحیه تغییر می‌کند و همین موضوع بر زمان پیمایش صوت اثر می‌گذارد (صوت در جهت جریان تندتر حرکت می‌کند) [۲]. بدین‌گونه تصویر برش‌نگاشتی از سه رنگ سیاه و خاکستری و سپید ساخته می‌شود. با این انتخاب قراردادی، رنگ خاکستری تصویر (زمینه‌ی تصویر) نشانه‌ی نبود جریان، و رنگ سیاه یا سپید نشانه‌ی وجود جریان در آن ناحیه‌ی خاص است. البته وجود دو جریان سیاه و سپید در زمینه‌ی خاکستری بیان‌گر ناهمسو بودن این دو جریان است. ضمن آن‌که سیاهی یا سپیدی بیش‌تر بیان‌گر شدت جریان بیش‌تر است (می‌توان تصاویر را کدبندی رنگی کرد و جریان‌ها را با هر رنگ دلخواه نیز نمایش داد).

۲-۵- داده‌سازی و آزمون برنامه

در داده‌سازی کامپیوتری، می‌توانیم پرتونگاشت‌ها را به‌روش ریاضی، و با دقت دلخواه، بسازیم. برای این کار ابتدا فرض می‌کنیم که جریان شکل یک بیضی به معادله‌ی زیر را دارد:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1 \qquad (۶)$$

حال اگر شدت جریان را در راستای یک قطر بیضی ثابت و برابر v_0 بگیریم، می‌توان نشان داد که پرتونگاشت $s_\varphi(u)$ در یک زاویه‌ی خاص φ از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید [۷].

$$s_\varphi(u) = \begin{cases} \dfrac{2ab\sqrt{u_m^2 - u^2}}{u_m^2} v_0 & |u| \le u_m \\ 0 & |u| > u_m \end{cases} \qquad (۷)$$

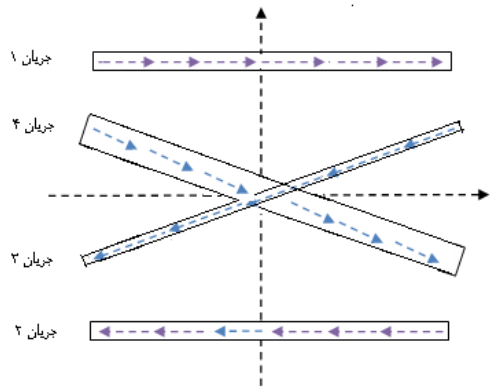
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.5.0]

به‌طوری‌که $u_m^2 = a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi$.

در برنامه‌ی داده‌سازی از همین رابطه استفاده شده، ضمن آن‌که a نسبت به b بسیار بزرگ در نظر گرفته شده است تا شکل جریان کشیده و در عمل مستطیلی شود. از سوی دیگر، به‌راحتی می‌توان دید که عمل‌گر پرتونگاشت (افکنش) بر هر تابعی اثر کند، دارای خاصیت‌های برهم‌نهی، جابه‌جایی، و چرخش است. با استفاده از این ویژگی‌ها، سرانجام آن‌چه در هر عضو آرایه‌ی $s(i, j)$ ذخیره می‌شود، یک عدد است که نشان‌دهنده‌ی زمان پیمایش پرتو در یک جهت خاص است.

برای آزمودن برنامه، در کل چهار جریان در نظر گرفته شده است، شکل ۳. اگر شعاع دایره‌ی برش‌نگاشتی را ۱ واحد (برای نمونه، ۱۰۰ کیلومتر) و مبدأ مختصات را در مرکز دایره‌ی برش‌نگاشتی بگیریم، در وهله‌ی اول شدت جریان‌های ۱ تا ۴ به‌ترتیب ۱+ و ۱- و ۰/۵- و ۱/۵+ تعریف شده است (شدت‌های مثبت و منفی بیان‌گر ناهمسو بودن جریان‌هاست. هدف، بازسازی دو جریان ۳ و ۴ بوده است. درواقع با تعریف دو جریان معلوم ۱ و ۲ به‌صورت بالا، معیاری برای سنجش شدت جریان‌های مجهول تعریف می‌شود).



شکل ۳- جریان‌های فرضی موجود در ناحیه‌ی برش‌نگاشتی

۳- نتایج

سرانجام تصویر بازسازی‌شده توسط برنامه‌ی کامپیوتری، با پارامترهای تعریف‌شده، مطابق شکل ۴ است. چنان‌که گفته شد، تنها بخش‌های سیاه و سپید نشانه‌ی وجود جریان‌اند. این تصویر بیان‌گر آن است که دو جریان افقی سپید و سیاه بالا هردو دارای شدت یکسان (شدت معیار ۱) ولی ناهمسو با یکدیگرند. جریان پهن مورب سپیدی پررنگ‌تر و جریان باریک مورب سیاهی کم‌رنگ‌تری به‌ترتیب نسبت به جریان افقی بالا و جریان افقی پایین دارند. تصویر بالا با پارامترهای تعریف‌شده به‌خوبی همخوانی دارد (یادآور می‌شود که در آن‌جا جریان پهن مورب شدت 1.5+ و جریان باریک مورب شدت 0.5- را دارند).



شکل ۴- تصویر بازسازی شده توسط برنامه کامپیوتری

برای آزمون بیش‌تر برنامه در تعریف داده‌های اولیه شدت‌های دو جریان مورب سه بار تغییر داده شد (البته مکان و پهنای جریان‌ها دست‌نخورده است) و با اجرای برنامه‌ی بازسازی سه تصویر دیگر نیز به‌دست آمد: شکل ۵ آ برای جریان پهن مورب به شدت 1.5+ و جریان باریک مورب به شدت 0.2-، شکل ۵ ب برای جریان پهن مورب به شدت 0.2+ و جریان باریک مورب به شدت 0.5-، شکل ۵ ج برای جریان پهن مورب به شدت 0.2+ و جریان باریک مورب به شدت 0.2- به‌دست آمده‌اند. سپیدی و سیاهی رنگ جریان‌ها در این سه شکل چشمداشت مورد نظر از برنامه را به‌خوبی برآورده می‌سازد.



آ ب ج

شکل ۵- تصاویر بازسازی شده توسط برنامه‌ی کامپیوتری برای آزمون بیش‌تر

۴- جمع‌بندی

در این مقاله، بر پایه‌ی گذر صوت پایین‌فرکانس از آب‌های زیر سطحی دریاها، روش ویژه‌ای برای بازسازی کامپیوتری شکل مسیر و شدت جریان‌های دریایی در برش یا سطح مقطع خاصی از زیر آب مطرح شد. این روش بر پایه‌ی تفاوت میان زمان‌های پیمایش صوت در مکان‌هایی است که چگالی آب یک مکان با مکان دیگر تفاوت دارد و با آن می‌توان، افزون بر جریان‌ها، هر جسم شفاف ناشناسی که سر راه صوت قرار دارد، و صوت می‌تواند از درون آن گذر کند، به تصویر کشید. طراحی کار با دستگاه «چشمه-گیرنده‌ی صوتی چرخان» صورت گرفت که بر اساس آن، دستگاه چشمه-گیرنده در عرض ناحیه‌ی مورد نظر بر یک خط راست حرکت می‌کند و به فواصل زمانی دلخواه، ارسال صوت و دریافت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.5.0]

پالس و ثبت زمان تکرار می‌گردد. به لحاظ نظری می‌توان تنها با سه یا چهار بار اندازه‌گیری، در سه یا چهار زاویه‌ی مختلف، کار را به پایان رساند، سپس عملیات بازسازی و پردازش تصویر را بر داده‌ها اعمال کرد. ولی روشن است که هرچه شمار زوایای اندازه‌گیری در یک چرخش کامل بیش‌تر باشد، داده‌های بیش‌تری به‌دست می‌آید و تصویر برش‌نگاشتی دقیق‌تر خواهد شد. این امر، در اصل، بسته به آن است که تفکیک فضایی مورد نظر چقدر باشد. در متن، برای تفکیک فضایی *1.125* کیلومتر در میدان دید *100* کیلومتر، شمار زوایای بهینه در حدود *126* برآورده شده است. .

کار عرضه شده در گام فعلی یک پژوهش نظری است و آزمون برنامه هم با داده‌های شبیه‌سازی‌شده، که به روش ریاضی و با دقت دلخواه ساخته می‌شوند، انجام گرفته و البته تصاویر بازسازی‌شده چشمداشت مورد نظر از برنامه را به‌خوبی برآورده ساخته است. به‌طبع اجرای عملی هر نوع برش‌نگاری صوتی در دریا و اقیانوس، با داده‌های تجربی، مسائل و دشواری‌های خاص خود را دارد. افزون بر کشتی یا کشتی‌های مجهز پژوهشی، و دستگاه‌های دقیق ارسال و ردگیری پرتو، نیاز به تمهیدهای دیگری نیز هست، کارهایی مانند ثابت نگه‌داشتن فاصله‌ی بزرگ میان چشمه و گیرنده در هر بار اندازه‌گیری، تصحیح خطاهای ناشی از پراکندگی صوت و خطاهای ناشی از دستگاه‌های اندازه‌گیری، ... همچنین در فاصله‌های بسیار بزرگ لازم است خمیدگی ناشی از سطح کروی زمین به‌نوعی در تصویر لحاظ شود.

کلید واژگان

1- parallel projection
2- back-projection
3- fast Fourier transforms

۵- مراجع

1- Munk, W.H. and Wunsch, C.*, (1979), Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring*, Deep Sea Research. Vol. 26, p.123–161.

2- Cornuelle B.D., Worcester, P.F. and Dzieciuch, M.A, (2008), *Ocean acoustic tomography*, Journal of Physics Conference Series, Vol. 118 (1), 012002, http://iopscience.iop.org/1742-6596/118/1/012002.

3- Jensen F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B. and Schmidt, H., (2011), *Computational ocean acoustics*, second ed., Springer.

4- Jonsson P., Sillitoe, I., Dushaw, B., Nystuen, J. and Heltne, J., (2009), *Observing using sound and light – a short review of underwater acoustic and video-based methods,* Ocean Sci. Discuss., Vol. 6, p.819–870.

5- Munk W., Worcester, P. and Wunsch, C., (1995), *Ocean acoustic tomography*, Cambridge University Press.

6- Natterer F.*, (1985), The mathematics of computerized tomography*, Wiley.

7- Jain A. K., (1989), *Fundamentals of digital image processing*, Prentice-Hall.

8- Brigham E.O.*, (1988), The fast Fourier transform and its applications*, Prentice-Hall.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.5.0]