

مدل عددی دو بعدی انتشار امواج صوتی در آب های تنگه هرمز به روش تفاضل محدود

نرگس ناظمیه^۱، افشین محسنی آراسته^{۲*} و محمد رضا سهیلی فر^۳
۱ و ۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، دانشکده علوم و فنون دریایی، تهران، ایران
۳. دانشگاه علوم دریایی امام خمینی
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۲

چکیده

در تحقیق حاضر شبیه سازی عددی دو بعدی انتشار امواج آکوستیک برای نشان دادن نحوه انتشار جبهه های موج صوتی در آب های کم عمق تنگه هرمز مورد بررسی قرار گرفته است. از این شبیه سازی عددی می توان در بررسی اثرات سه بعدی انتشار صوت در این آب ها نیز استفاده نمود. شبیه سازی انتشار صوت در آب های کم عمق برای طیف وسیعی از روش های مدل سازی با درجات مختلف دقت قابل ارائه می باشد. یکی از این روش ها که شامل استفاده از روش تفاضل محدود است، در بیان انتشار امواج زلزله در آب های کم عمق مناسب می باشد. پژوهش حاضر به بررسی استفاده از روش تفاضل محدود برای مدل سازی انتشار در حوزه زمان و برای نشان دادن انتشار جبهه های موج با استفاده از برنامه های **FORTRAN** و **MATLAB** پرداخته است. نتایج حاصل از این شبیه سازی نشان می دهد که در اثر تغییر عمودی سرعت صوت، امواج منتشره به دو شاخه تقسیم می شوند و در نهایت حرکت گردابی امواج صوتی را به وجود می آورد و مناطق با نوفه زیاد مشخص می شود.
واژه گان کلیدی: مدل انتشار، آب کم عمق، موج صوتی

مقدمه

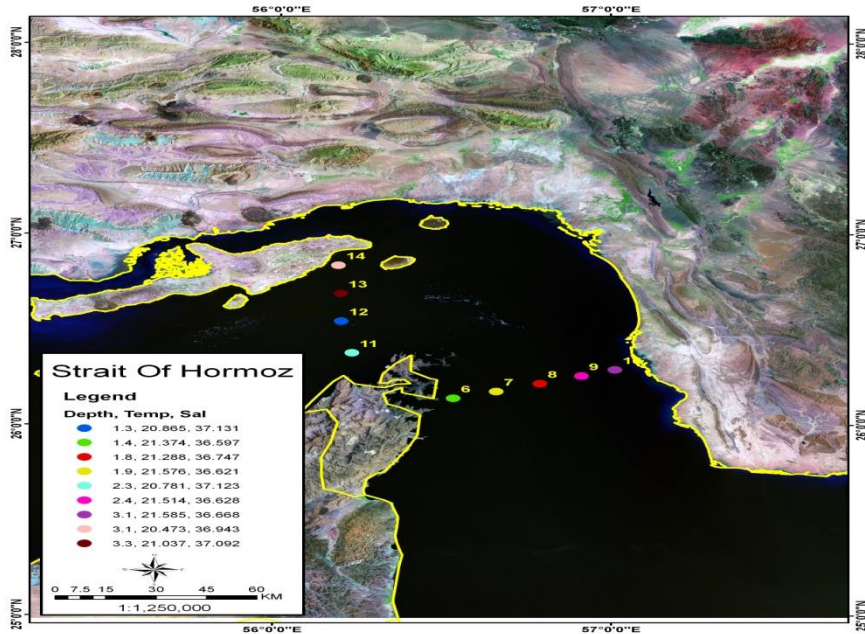
محاسبه فشار و اساس مدل سازی انتشار امواج صوتی در محیط اقیانوسی، به دست آوردن شدت تضعیف انرژی در هر نقطه دلخواه از محیط زیر آب دریا بر اساس حل معادله موج می باشد. یکی از روش های مناسب و متداول برای مدل سازی انتشار امواج صوتی فرکانس پایین در محیط های وابسته به برد، روش های مبتنی بر معادلات سهموی (PE) است. در بیشتر مدل سازی های مربوط به امواج زمین لرزه ای نیز لزوماً از معادلات امواج کشسان استفاده می شود (Kelly *et al.*, 1976; Colosi, 2015; Sridevi *et al.*, 2010) لیکن معادلات امواج صوتی در روش های مدل سازی ژئوفیزیکی نیز مورد استفاده قرار می گیرند (Raghukumar *et al.*, 2015; Alford *et al.*, 1974) کاربرد معادلات امواج کشسان در بررسی انتشار موج در بستر دریا بسیار ضروری است و هنگامی که سرعت های برشی کم است، می توان تقریب موج آکوستیکی را برای رسوبات بستر دریا استفاده نمود.

محققین بسیاری نسبت به ارائه مدل های عددی مناسب برای معادلات موج انتشار امواج آکوستیکی زیر آب و امواج زلزله اقدام نموده اند. Alford و همکاران در سال ۱۹۷۴ دقت مدل تفاضل محدود انتشار امواج آکوستیک در آب ارائه نمودند. Kelly و همکاران در سال ۱۹۷۶ نیز مدل تفاضل محدودی برای انتشار امواج زلزله در آب ارائه کردند. روش تفاضل مرکزی برای انتشار امواج زلزله در آب نیز قابل استفاده می باشد (Alford *et al.*, 1974). Zakaria در سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸ بین درجات مختلف تفاضل محدود در حوزه زمان

مقایسه کرده و روند انتشار امواج صوتی از سطح تا عمق را نمایش داد. از آنجائیکه مدل سازی عددی برای پشتیبانی داده های میدانی به کار می رود تا نتایج نهایی برای آزمون روش ها و پارامترهای پردازش، تهیه شده و درک مناسبی از انتشار موج بدست دهند، لذا برای این منظور روش تفاضل محدود برای مدل سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق پیش رو، جملات بکار رفته در معادله موج، برای انتشار امواج در سیالات و ایجاد تغییر شکل در آنها همچنین انتشار امواج صوتی در سیالات و امواج منتشره در جامدات که شامل هر دو نوع موج برشی و تراکمی می باشد، مناسب هستند. در پژوهش حاضر یک مدل عددی دو بعدی برای انتشار امواج آکوستیکی در آب های کم عمق تنگه هرمز که می تواند منجر به طراحی یک برنامه رایانه ای به منظور شبیه سازی انتشار شود، بررسی شده است.

مواد و روش ها

مراحل اساسی در مدل شبیه سازی در آب های کم عمق تنگه هرمز در پژوهش حاضر عبارتند از:
الف) استفاده از معادله موج آکوستیکی
ب) مدل سازی در محدوده زمان
داده های گشت دریایی ROPME برای ایستگاه های ۶ تا ۱۰ تا عمق ۴۰ متری در تنگه هرمز استفاده شده است. شکل شماره (۱) ایستگاه های بررسی شده در گشت دریایی ROPME(2001) را نمایش می دهد.



شکل ۱ - ایستگاه های مورد نظر برای انجام عملیات مدل سازی

در پژوهش حاضر، معادله موج آکوستیکی دو بعدی با استفاده از معادله اولر و معادله پیوستگی (Etter, 2013) به صورت زیر ارائه شده است:

(۱)

معادله پیوستگی

معادله اولر

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho c^2 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla P = 0$$

با جایگذاری دیورژانس معادله اولر و مشتق معادله پیوستگی نسبت به زمان:

که در آن \mathbf{u} سرعت ذره بر حسب متر بر ثانیه، p فشار آکوستیکی بر حسب پاسکال، $\rho = \rho(x, z)$ چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و $c = c(x, z)$ سرعت موج صوتی بر حسب متر بر ثانیه، در محیط آکوستیکی است.

(۳)

(۴)

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \rho c^2 \left\{ -\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla P \right] \right\} = \delta(r) f(t)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \rho c^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \right] \right\} = \delta(r) f(t)$$

برای محیط های همگن می توان معادله موج را به صورت زیر ساده نمود:

که در آن: $\delta(r)$ عبارت است از تابع دلتای دیراک مربوط به محل منبع صوتی در سطح آب و $f(t)$ نیز تابع منبع صوتی است.

(۵)

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - c^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right\} = \delta(r) f(t)$$

در این رابطه سرعت صوت (c) در هر مقطع ثابت در نظر گرفته شده است.

$f(t)$ به صورت زیر در نظر گرفته شد:

(۶)

$$f(t) = \sin t \times e^{-t}$$

حل عددی معادله انتشار موج صوتی در دو بعد

در یک محیط همگن، معادله موج صوتی به صورت زیر ساده

می‌شود:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - c^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right\} = f(t) \quad (7)$$

در این رابطه c سرعت صوت و P فشار صوت می‌باشند. $f(t)$ تابع منبع صوت است که می‌توان با توجه به منبع نوع آن را مشخص نمود که به طور معمول تابعی سینوسی از زمان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مکان قرارگیری منبع صوت، این امکان وجود دارد که این تابع در معادله اصلی قرار نگیرد و در شرایط مرزی لحاظ گردیده است. بنابراین:

در حل عددی این معادله، دقت با مرتبه h^2 در نظر گرفته شده است. مشتقات مرتبه دوم با استفاده از روش تفاضل محدود مرکزی (Alford et al., 1974) نوشته شده است:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{P_{i,j}^{k+1} - 2P_{i,j}^k + P_{i,j}^{k-1}}{\Delta t^2} + O(\Delta t^2)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j}^k - 2P_{i,j}^k + P_{i-1,j}^k}{\Delta x^2} + O(\Delta x)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{P_{i,j+1}^k - 2P_{i,j}^k + P_{i,j-1}^k}{\Delta z^2} + O(\Delta z)$$

مقدار فشار صوت در نقطه i در طول و j در عمق و در زمان $k+1$ می‌باشد.

با جایگزاری روابط بالا در معادله اصلی فشار، رابطه زیر حاصل می‌شود:

Δx ، Δz و Δt به ترتیب المان‌های مربوط به مکان، عمق و زمان می‌باشند. i شمارنده مکان در طول، j شمارنده مکان در عمق و k شمارنده زمان می‌باشد؛ پس برای مثال: $P_{i,j}^{k+1}$

$$\frac{P_{i,j}^{k+1} - 2P_{i,j}^k + P_{i,j}^{k-1}}{\Delta t^2} = c^2 \left(\frac{P_{i+1,j}^k - 2P_{i,j}^k + P_{i-1,j}^k}{\Delta x^2} \right) + c^2 \left(\frac{P_{i,j+1}^k - 2P_{i,j}^k + P_{i,j-1}^k}{\Delta z^2} \right) + O(\Delta t^2 + \Delta x + \Delta z) \quad (10)$$

و داریم:

$$P_{i,j}^{k+1} = \Delta t^2 c^2 \left(\frac{P_{i+1,j}^k - 2P_{i,j}^k + P_{i-1,j}^k}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^k - 2P_{i,j}^k + P_{i,j-1}^k}{\Delta z^2} \right) + 2P_{i,j}^k - P_{i,j}^{k-1} + O(\Delta t^2 + \Delta x + \Delta z) \quad (11)$$

شرط پایداری نیز به صورت زیر استفاده شده است:

بدین ترتیب با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار فشار صوت در نقطه (i,j) در زمان $(k+1)$ را با استفاده از نقاط معلوم در زمان (k) محاسبه نمود.

$$1 - 2 \left(\frac{c^2 \Delta t^2}{\Delta x^2 \Delta y^2} \right) \geq 0 \quad (12)$$

$$\frac{c^2 \Delta t^2}{\Delta x^2 \Delta y^2} \leq \frac{1}{2} \quad (13)$$

داشت:

برای حل این معادله به شرایط مرزی و شرایط اولیه نیاز می‌باشد:

شرایط مرزی چپ:

برای شرایط مرزی از روابط (Reynolds, 1978) استفاده شده است، که با جایگذاری روش تفاضل محدود خواهیم

$$\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) = 0 \quad (14)$$

$$P_{1,j}^{k+1} = P_{1,j}^k + P_{2,j}^k - P_{2,j}^{k-1} + c \frac{\Delta t}{\Delta x} (P_{2,j}^k - P_{1,j}^k - (P_{3,j}^{k-1} - P_{2,j}^{k-1}))$$

شرایط مرزی راست:

$$\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right) = 0 \quad (15)$$

$$P_{n+1,j}^{k+1} = P_{n+1,j}^k + P_{n,j}^k - P_{n,j}^{k-1} + c \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(P_{n,j}^k - P_{n+1,j}^k - (P_{n-1,j}^{k-1} - P_{n,j}^{k-1}) \right)$$

شرایط مرزی بالایی:

$$\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\Delta t}{\Delta z} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right) = 0 \quad (16)$$

$$P_{i,1}^{k+1} = P_{i,1}^k + P_{i,2}^k - P_{i,2}^{k-1} + c \frac{\Delta t}{\Delta z} \left(P_{i,2}^k - P_{i,1}^k - (P_{i,3}^{k-1} - P_{i,2}^{k-1}) \right)$$

شرایط مرزی پایینی:

$$\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\Delta t}{\Delta z} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right) = 0 \quad (17)$$

$$P_{i,m+1}^{k+1} = P_{i,m+1}^k + P_{i,m}^k - P_{i,m}^{k-1} + c \frac{\Delta t}{\Delta z} \left(P_{i,m}^k - P_{i,m+1}^k - (P_{i,m-1}^{k-1} - P_{i,m}^{k-1}) \right)$$

با توجه به اینکه منبع صوت بر روی سطح در نظر گرفته شده است (Wang & Zhang, 2004)، ساده‌سازی معادله شرایط مرزی بالایی به صورت زیر انجام گردیده است:

$$\frac{1}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right) = f(t) \quad (18)$$

برای رسیدن به حالت پایداری روش تفاضل محدود در جهت t از خطای مرتبه ۱ در روش پیشرونده استفاده شده است :

$$P_{i,1}^{k+1} = P_{i,1}^k + c \frac{\Delta t}{2\Delta z} \left(P_{i,3}^k - 4P_{i,2}^k + 3P_{i,1}^k \right) + c\Delta t (\sin t \times e^{-t}) \quad (19)$$

تنگه هرگز حل شده‌اند و از نرم افزار EXCEL برای محاسبه سرعت صوت در عمق های متفاوت و هر ایستگاه استفاده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی معادلات، مجهولات زمان‌های بعدی با مقادیر فشار زمان‌های قبلی بدست می‌آیند.

در جدول (۱) مقادیر گام های مکانی و زمانی برای حل معادلات با توجه به پایداری مدل نشان داده شده است :

آنالیز آماری

با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و FORTRAN، معادلات تا عمق ۴۰ متری و برای ایستگاه‌های ۶ تا ۱۰ در

جدول ۱- مقدار گام های مکانی و زمانی استفاده شده در مدل سازی

پارامتر	مقدار
Δx	۱۳۳۰۰m
Δz	۴m
Δt	20msec

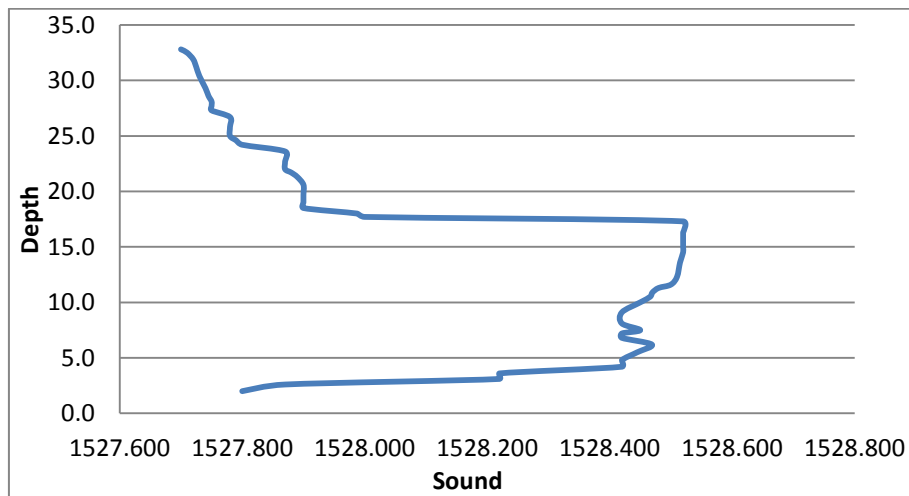
معادلات موج تنها برای ۵ ایستگاه ۶ تا ۱۰ و تا عمق ۴۰ متری حل شده‌اند. مقادیر سرعت صوت با استفاده از رابطه Medwin (Etter, 2013) محاسبه شده است.

$$c = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.017Z \quad (20)$$

که در آن T دما بر حسب سلسیوس، S شوری بر حسب نتایج قسمت در هزار و Z عمق بر حسب متر می‌باشد.

به سمت عمق تغییر می کند. مدت زمان محاسبه 6000msec انتخاب شد که دلیل آن عمق کم منطقه مورد مطالعه می باشد که حدود ۴۰ متر در نظر شده است. شکل (۲)، منحنی تغییرات سرعت صوت با عمق در ایستگاه ۷ است و همانگونه که ملاحظه می شود تغییرات تند سرعت صوت را در بازه عمقی ۳ تا ۱۸ متر نشان می دهد که بیانگر تغییرات تند چگالی در این محدوده عمقی می باشد. لذا فشار صوت در مدل سازی نیز تحت تاثیر این تغییرات قرار خواهد گرفت.

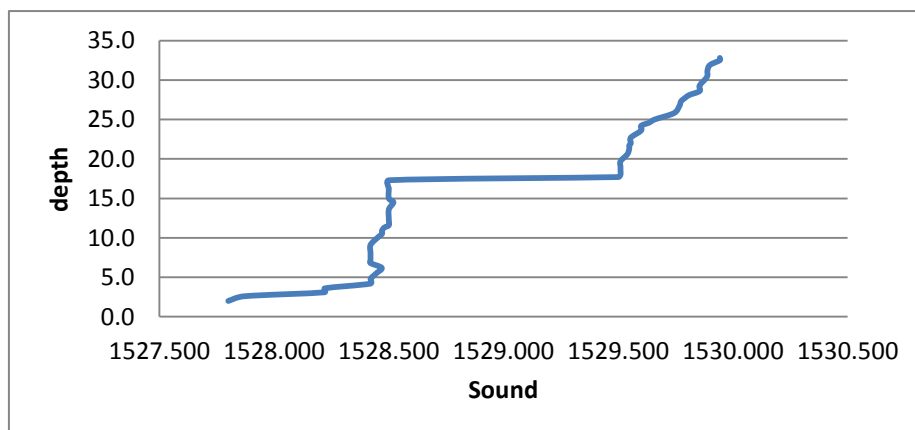
عواملی که در مدل سازی بر سرعت صوت تاثیر می گذارند عبارتند از: چگالی، عمق، دما و سرعت آب و همچنین فشار صوت که به نوع منبع صوتی و محل و فرکانس آن وابسته است. در شکل های (۴ الی ۱۱) ایستگاه ها بر روی محور افقی نشان داده شده اند و محور عمودی مربوط به عمق است که محاسبات برای آن انجام شده است. فشار صوت در اعماق مختلف نیز توسط محور رنگی مشخص گردیده است که بر حسب Pa می باشد. در ابتدا شدت فشار صوتی برابر با ۱۴۰ dB در نظر گرفته شد که با گذشت زمان و حرکت موج



شکل ۲- منحنی تغییرات سرعت صوت در ایستگاه ۷

تغییرات تند سرعت صوت بین اعماق ۵ تا ۱۵ متر و ۲۰ تا ۳۰ متر دیده می شود و تغییرات دما در این منطقه اتفاق می افتد.

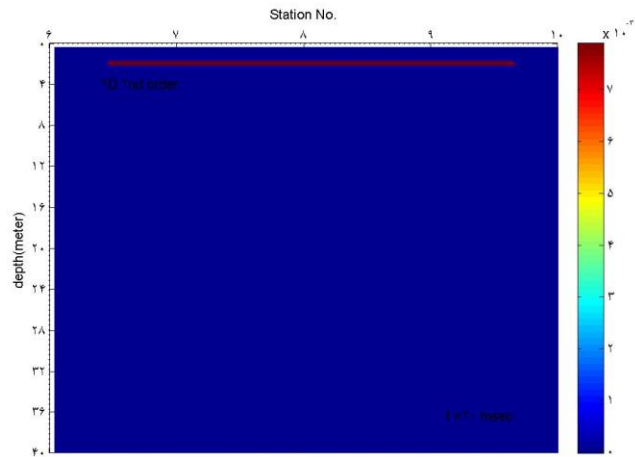
شکل (۳) منحنی تغییرات سرعت صوت با عمق برای ایستگاه ۸ را نمایش می دهد و همان طور که ملاحظه می شود



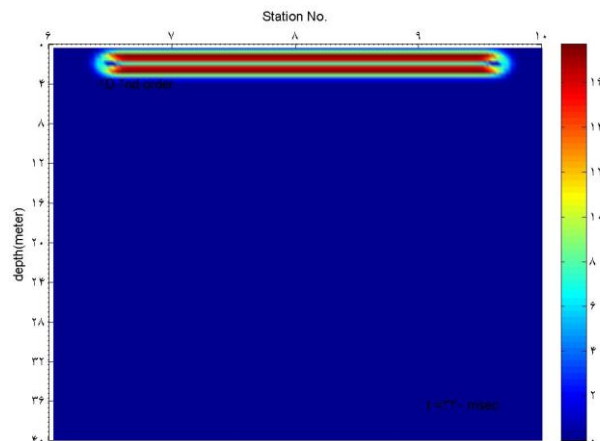
شکل ۳- منحنی تغییرات سرعت صوت برای ایستگاه ۸

افزار FORTRAN در نرم افزار MATLAB اجرا شده است. نتایج به شرح زیر بدست آمد.

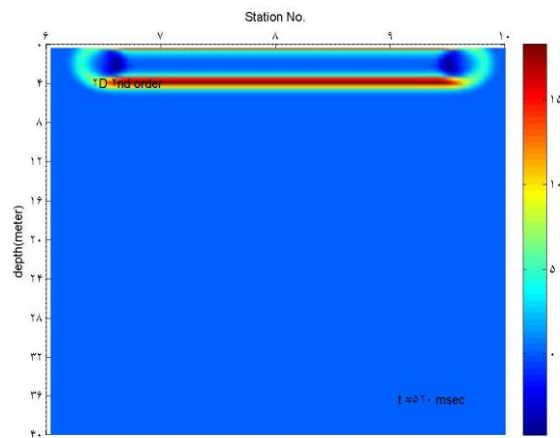
با توجه به نقاط بسیار زیاد مورد محاسبه، محاسبات عددی توسط نرم افزار FORTRAN نوشته شد و خروجی نرم



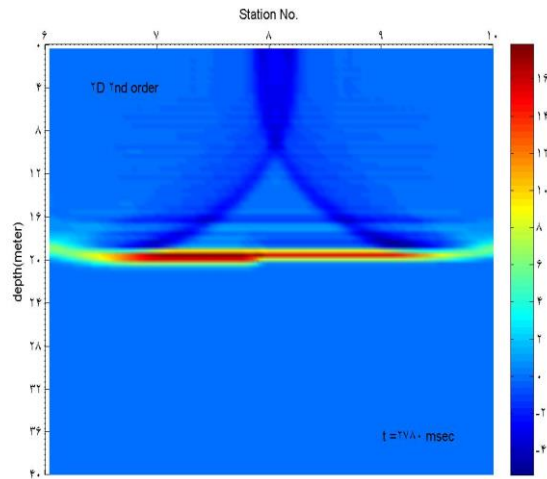
شکل ۴- شبیه سازی انتشار موج در شروع انتشار در لحظه $t=20\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



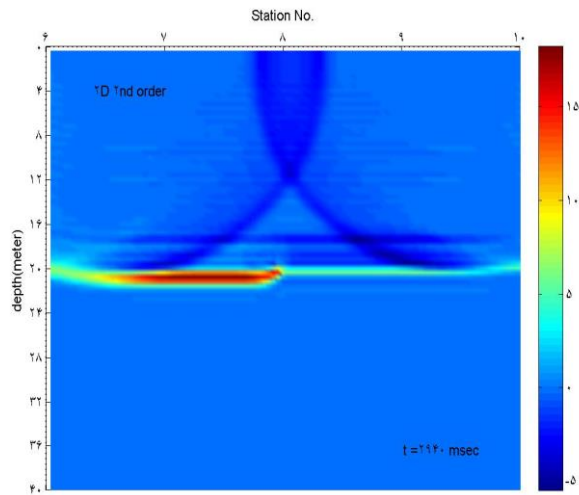
شکل ۵- شبیه سازی انتشار موج در لحظه $t=340\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



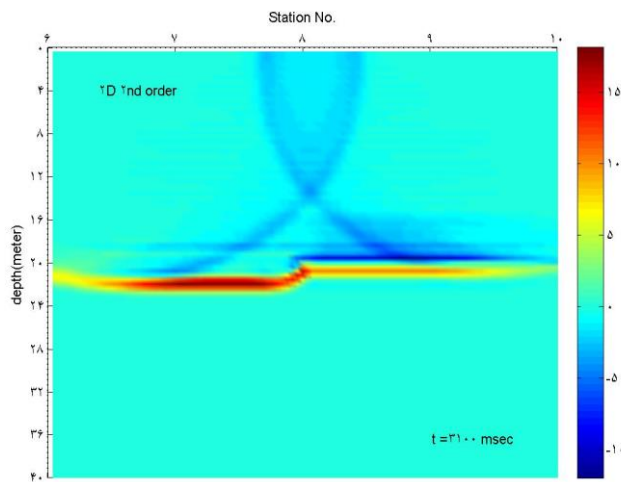
شکل ۶- شبیه سازی انتشار موج در لحظه $t=520\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



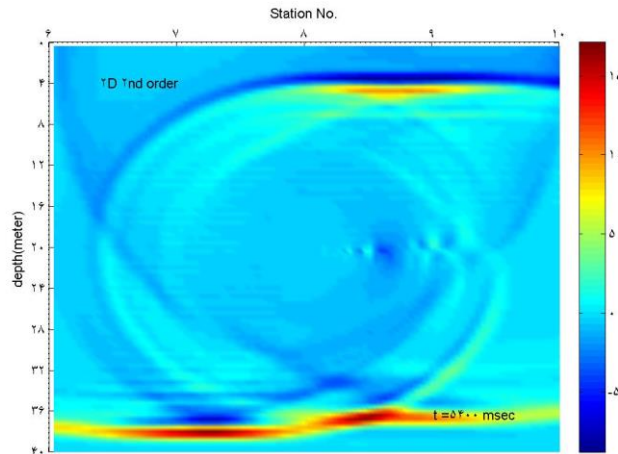
شکل ۷- شبیه سازی انتشار موج بعد از گذشت $t=2780\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



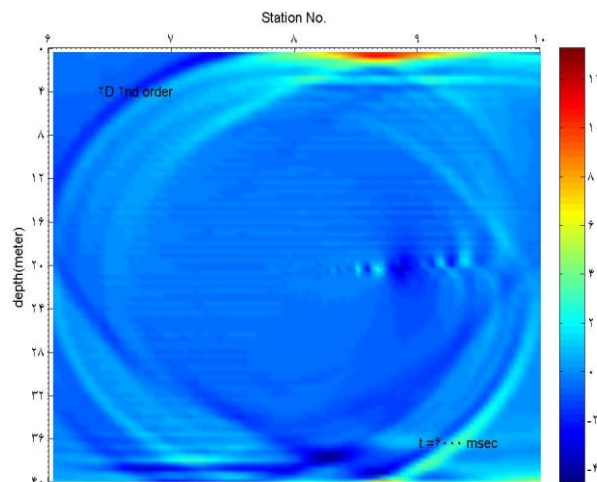
شکل ۸- شبیه سازی انتشار موج بعد از گذشت $t=2940\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



شکل ۹- شبیه سازی انتشار موج بعد از گذشت $t=3100\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



شکل ۱۰ - شبیه سازی انتشار موج بعد از گذشت $t=5400\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa



شکل ۱۱- شبیه سازی انتشار موج بعد از گذشت $t=6000\text{msec}$ برای تنگه هرمز بر حسب Pa

سرعت صوت زیاد است به جایی که سرعت صوت کم است حرکت کنند. موجی که به سمت بالا حرکت می کند، به دلیل در نظر نگرفتن انعکاس از سطح بعد از برخورد از بین می رود (شکل ۶).

در شبیه سازی موج صوتی شکل (۷) مشاهده می گردد که بعد از زمان 2780msec در بین عمق های ۱۶ الی ۲۰ متر در حرکت موج یک شکست ایجاد می شود.

همان طور که در شکل های (۴ الی ۱۱) مشاهده می شود، موج صوتی بعد از تولید شدن توسط لرزه نگارها به طور پیوسته در محیط انتشار پیدا می کند و این روند تا ثانیه 340 msec ادامه پیدا می کند (شکل ۵). در این لحظه موج صوتی در عمق ۲ متری از سطح آب به دو قسمت تبدیل می گردد. یک قسمت به سمت بالا حرکت می کند و قسمت بعدی پیشروی خود را به سمت عمق ادامه می دهد. دلیل این دو تکه شدن موج، تغییرات سرعت صوت است که به وضوح در منحنی های سرعت صوت (شکل های ۲ ، ۳) مشخص است. به این صورت که پرتوهای صوتی تمایل دارند از جایی که

بحث و نتیجه گیری

تنگه هرمز آبراهه ای است که از طریق آن آب های گرم و سرد از دریای عمان به خلیج فارس در رفت و آمد هستند. در این نقاط طبق منحنی های سرعت صوت که در شکل های (۳ و ۴) نشان داده شده است، سرعت صوت تغییرات زیادی دارد. سرعت حرکت موج صوتی در سمت راست شکل (۷) نسبت به سمت چپ کمتر شده و شکسته می شود. یک قسمت به سمت سطح رفته و موج بعدی با کمی تاخیر به دنبال موج اصلی به سمت پایین می رود (شکل های ۸ و ۹). سرعت صوت بین ایستگاه های ۶ تا ۸ در عمق ۱۸ متری کم شده است. کم شدن سرعت صوت به وضوح در شبیه سازی با افزایش فشار صوتی مشخص است. بعد از شکسته شدن موج به دلیل تغییرات سرعت ، موج سمت راست دو قسمت می شود که یکی به سمت بالا و دیگری به سمت پایین حرکت می کند. حرکات گردابی که در اثر این انتشار موج پدید می آید در شکل (۹) مشهود است.

طبق شکل (۱۱) وقتی موج صوتی به مرز بالا و پایین برخورد می نماید به دلیل اینکه در کف(بستر)، شرط بستر بی نهایت و در بالا، سطح بدون انعکاس در نظر گرفته شده است، از بین می رود. در اینجا فرض شده است که منبع فقط یک بار تولید موج می کند و به این دلیل بعد از جذب شدن موج، موج دیگری برای انتشار وجود ندارد. با توجه به خروجی نرم افزار در این تحقیق به روشنی تاثیر اختلاف شدید دما و تغییرات سرعت صوت که در اینجا ناشی از دما و شوری است، دیده می شود. در جاییکه سرعت صوت به شدت تغییر می کند، شکستی در حرکت موج صوتی ایجاد می شود که موج را به دو قسمت می نماید. نتایج حاصل این نقطه را روشن می کند که موج صوتی تولید شده از منطقه ای که سرعت بالا دارد باید به منطقه ای که سرعت کمتر دارد حرکت کند و روش حرکت به سمت عمق، چگونگی تضعیف و مناطق با نوفه زیاد را می توان تشخیص داد.

منابع

- Sridevi, B., RamanaMurty ,T.V., Sadhuram.Y, Rao ,M.M.M., Maneesha.K, SujithKumar S., Prasanna, P.L., 2010. Impact of internal waves on sound propagation off Bhimilipatnam, east coast of India. *Estuarine, coastal and Shelf Science*, 88:249-259.
- The Mt. Mitchell Cruise To The Ropme Sea Area, 2001.
- Wang, X. & Zhang, H. 2004. Modeling of Elastic Wave Propagation on a Curved Free Surface Using an Improved Finite-Difference Algorithm. *Science in China Series G: Physics Mechanics and Astronomy*, 47(5): 633–648.
- Zakaria, A. 2003. Numerical Modeling of Wave Propagation Using Higher Order Finite-Difference Formulas. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy of Curtin University of Technology, Australia.
- Zakaria, A. 2008. The Two Dimensional Numerical Modeling of Acoustic Wave Propagation in Shallow Water. Australian Acoustic Society Conference, Joondalup, Australia.
- Alford, R. M., Kelly, K. R. & Boore, D. M. 1974. Accuracy of Finite Difference Modeling of Acoustic Wave Propagation. *Geophysics*, 39(6): 834-842.
- Colosi, J. A. 2015. Sound Propagation through the Stochastic Ocean. Cambridge University Press, UK.
- Etter, P. C. 2013. Underwater Acoustic Modeling and Simulation (4th edition). Taylor & Francis, UK.
- Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel, S. & Alford, R. M. 1976. Synthetic Seismograms: A Finite Difference Approach. *Geophysics*, 41(1): 2-27.
- Raghukumar, K., C.A. Edwards, N.L. Goebel, G. Broquet, M. Veneziani, A.M. Moore, and J.P. Zehr. 2015. Impact of assimilating physical oceanographic data on modeled ecosystem dynamics in the California Current System. *Prog. Oceanogr.* 138:546–558.
- Reynolds, A. C. 1978. Boundary Conditions for the Numerical Solution of Wave Propagation Problems. *Geophysics*, 43: 1099-1110.

Two dimensional simulation of acoustic wave propagation in Hormoz Strait waters using finite difference method

Nazemiyeh, N.¹, Mohseni Arasteh, A.^{2*} & Soheilifar, M.³

1 & 2. Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

3. Imam Khomeini Naval University

Abstract

In this paper, a two dimensional simulation of acoustic wave propagation was evaluated to assess the dispersion of sound wave fronts in shallow waters. This simulation was used to survey three dimensional sound propagation effects in shallow water in Hormoz Strait. Sound wave propagation simulation is appropriate for wide range of modeling methods with different accuracy degrees. One of these methods which is based on finite difference method, is useful for describing seismic wave propagation in shallow waters. This paper focused on assessing the use of finite difference method in time domain propagation modeling and imaging wave front propagation using Matlab and FORTRAN. The results of this simulation showed that due to the vertical velocity change of the sound velocity, the waves were divided into two branches and ultimately the vortex generated the sound waves and the regions with high noise could be highlighted.

Key words: Propagation model, shallow water, sound wave

*Corresponding author: afshinma2000@yahoo.com