

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر امواج درونی بر روی انتشار امواج صوتی

حامد دلدار^۱، عباسعلی علی اکبری بیدختی^{۲*}، وحید چگینی^۳ و محمد اکبری نسب^۴

۱. دانشجوی دکتری، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳. استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

۴. استادیار، گروه علوم دریایی، دانشگاه مازندران، ایران

(دریافت: ۹۴/۱۱/۸، پذیرش نهایی: ۹۵/۱۱/۵)

چکیده

برای محاسبه فشار اکوستیکی در دریا با استفاده از روش‌های معمول، دانستن نحوه توزیع میدان چگالی و به تبع آن نحوه تغییرات سرعت صوت در محیط بسیار مهم است. عوامل محیطی بسیاری بر توزیع میدان چگالی در دریا تأثیرگذارند. یکی از این عوامل امواج درونی است که ساختار آن باعث تغییرات زمانی و مکانی میدان چگالی و به دنبال آن اثرگذاری روی نحوه انتشار امواج صوتی در اقیانوس می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی تأثیر امواج درونی ناشی از نوسان یک استوانه در یک کانال چینه‌بندی‌شده، روی انتشار امواج صوتی است. در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش‌های معمول امواج درونی در محیط تشکیل داده شد و با استفاده از فرستنده و گیرنده صوتی تأثیر امواج درونی بر انتشار امواج صوتی بررسی شد. همچنین علاوه بر نتایج عملی شبیه‌سازی با یک نرم‌افزار انتشار صوتی صورت گرفت که نتایج آن مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که امواج درونی در حالتی باعث جمع‌شدگی و پراکندگی پرتوهای امواج صوتی می‌شود و در حالاتی قدرت سیگنال صوتی را تا ۵۴ درصد کاهش دهد. در محیط‌های دریایی نیز به دلیل وجود این امواج تغییرات سیگنال صوتی می‌تواند رخ دهد.

واژه‌های کلیدی: امواج درونی، انتشار امواج صوتی، جمع‌شدگی و پراکندگی امواج صوتی، شبیه‌سازی موج صوتی.

۱. مقدمه

دریا نوعی موج‌بر (Waveguide) یا کانال صوتی است که از بالا به سطح آب و از پایین به بستر دریا محصور است. برای محاسبه فشار اکوستیکی در دریا با استفاده از روش‌های معمول، دانستن نحوه توزیع میدان چگالی و به تبع آن نحوه تغییرات سرعت صوت در محیط بسیار مهم است. عوامل محیطی بسیاری بر توزیع میدان چگالی در دریا تأثیرگذارند که بسته به شرایط محیطی و جغرافیایی، شدت و ضعف هر یک از آن‌ها متفاوت است. یکی از این عوامل امواج درونی (Internal waves) است. همان‌طور که در سطح دریا امواج وجود دارند، در داخل دریا و بین لایه‌های با چگالی متفاوت نیز ممکن است امواج تشکیل شوند که امواج درونی نامیده می‌شوند (پوند و پیکاردز، ۱۹۸۳).

اولین بار امواج درونی که به واسطه حرکت کشتی ایجاد شده بود، توسط اکمن در سال ۱۹۰۴ شناسایی شد (تروپ، ۲۰۰۵). امواج درونی به دلایل زیادی ایجاد می‌شوند که مهم‌ترین عامل آن، عبور جریان‌ات جزرومد از روی کوه‌های دریایی، پشته‌های فلات قاره یا شکستگی‌های فلات قاره است. انتشار امواج درونی که در مواردی ارتفاع آن به بیش از ۵۰ متر می‌رسد (تروپ، ۲۰۰۵) باعث تغییر در الگوی انتشار امواج صوتی در دریا می‌شود.

مطالعات متعددی در خصوص تأثیر انتشار امواج درونی بر انتشار امواج صوتی در دریا صورت گرفته است. در این مطالعات با استفاده از تعدادی فرستنده و گیرنده‌های صوتی

و n ام آکوستیکی هستند. امواج درونی در اندازه کوچک در محیطی دولایه یا با تعداد لایه‌های بیشتر قابل شبیه‌سازی در آزمایشگاه بوده و مطالعاتی نیز در این رابطه صورت گرفته است (سادرلند و لیندن، ۲۰۰۲؛ آگویلار و همکاران، ۲۰۰۶؛ روس و لوری، ۲۰۰۹؛ گوستیاگس و داگسویس، ۲۰۰۷؛ ماتور و پیکوک، ۲۰۰۹).

تأثیر امواج درونی بر انتشار موج صوتی فرکانس پایین، در اثر اختلال میدان صوتی کوچک $\delta c(x, y, z, t)$ که توسط تغییرات تصادفی عمودی لایه‌های آب ایجاد شده، به وجود آمده است. ضریب شکست محیط از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$n^2(x, y, z, t) \cong n_0^2(z) + \mu(x, y, z, t) \quad (2)$$

که در آن x, y, z مختصات کارتزین با محور z رو به پایین و t زمان است. $n_0(z) = \frac{c_0(0)}{c_0(z)}$ ؛ $c_0(z)$ میانگین پروفایل میدان سرعت صوت در فضا و زمان است و $\mu(x, y, z, t)$ مربع اختلال آن به علت موج درونی است و از رابطه (۳) به دست می‌آید.

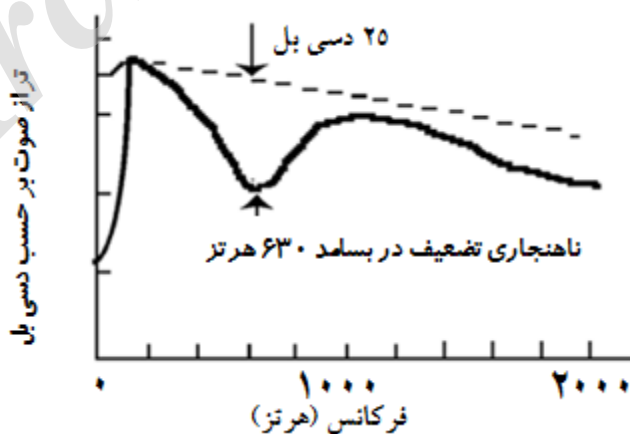
$$\mu(x, y, z, t) = -2\delta c(x, y, z, t) c_0^2(0) / c_0^3(z) \quad (3)$$

که برای میدان امواج درونی مقدار μ از طریق رابطه (۴) به دست می‌آید.

که معمولاً در فرکانس‌های نسبتاً پایین کار می‌کنند، تأثیر امواج درونی مطالعه می‌شوند (مانک و همکاران، ۱۹۸۱؛ اسکوتی و پیندا، ۲۰۰۴؛ رانتکو، ۲۰۰۵؛ تورگونت و پاسوارک، ۲۰۰۷؛ مورگانو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ریدر و همکاران، ۲۰۰۸؛ لینچ و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که امواج درونی در یک فرکانس خاص باعث افت شدت امواج صوتی خواهد شد که در اصطلاح به آن جفت‌شدگی مدها (coupling mode) گفته می‌شود. برای مثال وارن و ارناس و همکاران (۲۰۰۳) به مطالعه جفت‌شدگی‌های مدهای آکوستیکی در حضور امواج درونی پرداخته‌اند. در این مطالعه نشان داده شد که در بسامد ۶۳۰ هرتز و فاصله ۲۸ کیلومتری، اتلافی در حدود ۲۵ دسی‌بل بیشتر از سایر بسامدها صورت گرفته است (شکل ۱). زیرا در بسامد تشدید (۶۳۰ هرتز) مدهای آکوستیکی در اصطلاح کوپل می‌شوند و انرژی از یک مد به مد دیگر انتقال پیدا می‌کند. رابطه (۱) نشان‌دهنده ارتباط عدد موج درونی و گذار بین مدهای m و n ام آکوستیکی است.

$$k_{\text{solitary wave}} = \Delta k_{\text{acoustic}} = \left(\frac{2\pi}{\lambda m} - \frac{2\pi}{\lambda n} \right) \quad (1)$$

که در آن k عدد موج، λm و λn طول موج مدهای m ام



شکل ۱. تأثیر امواج درونی بر روی تضعیف امواج صوتی، در آن جفت‌شدگی مدها باعث تضعیف شدت صوت شده است (وارن و ارناس و همکاران، ۲۰۰۳).

(رابرتز، ۱۹۷۵).

ابتدا مورد جبهه موج تخت تک‌موج را در نظر می‌گیریم؛ یعنی فرض می‌کنیم تابع جابه‌جایی عمودی فقط به مختصه y وابسته باشد. به علاوه، بر طبق فرض صلب بودن محیط داریم:

$$\zeta = \zeta_s(y - ut) = \zeta_s(y - y_0) \quad (6)$$

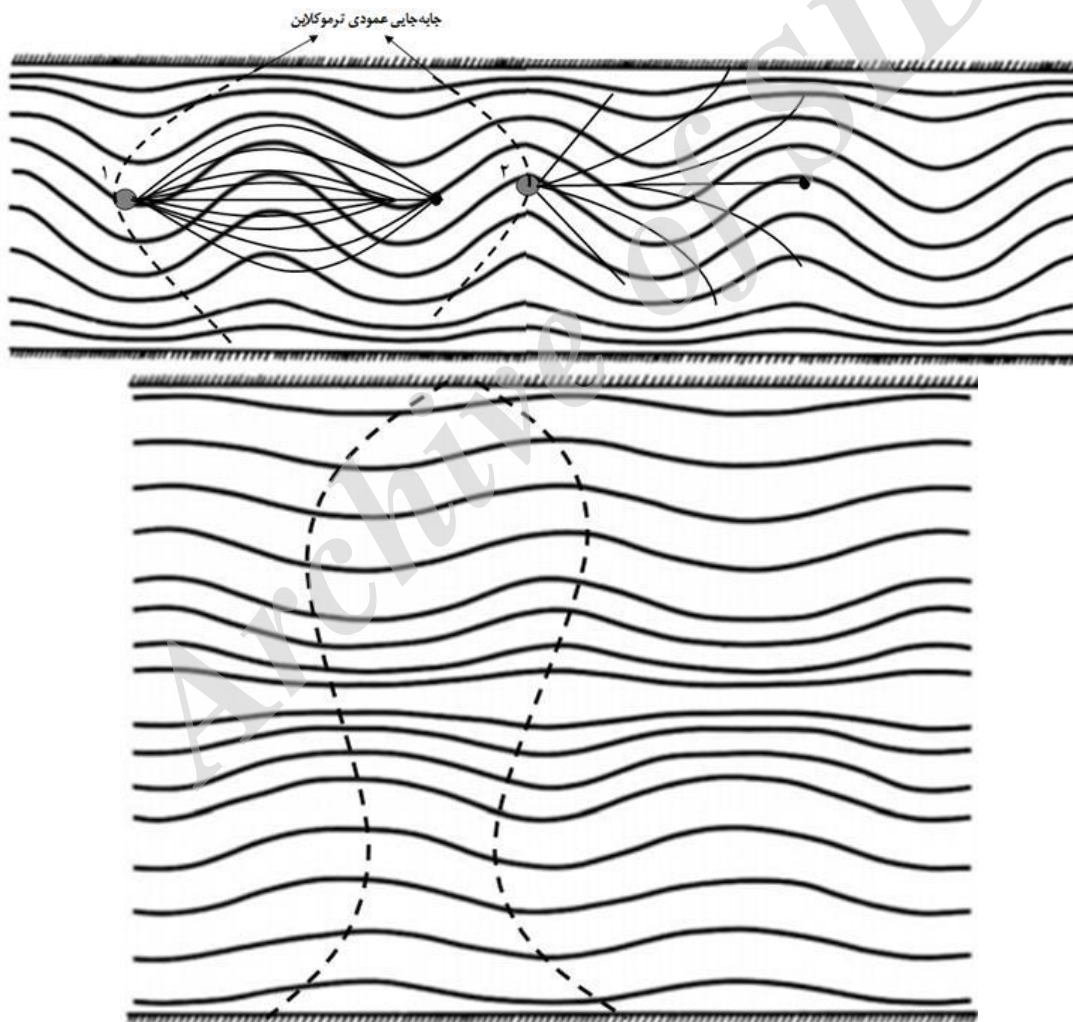
که پارامتر y_0 مکان منبع نسبت به y است و الگوهای پرتو برای پرتوهای افقی در صفحه (x, y) مشابه پرتوهای صفحه محیط لایه‌بندی شده رسم می‌شود.

$$\mu = -2QN^2(z)\zeta(x, y, z, t) \quad (4)$$

که در آن Q ضریبی وابسته به خصوصیات فیزیکی آب (برای اقیانوس $Q \cong 2.4 \text{ s}^2/\text{m}$) و $N(z)$ فرکانس شناوری است و $\zeta(x, y, z, t)$ جابه‌جایی عمودی سیال است که به شکل رابطه (۵) می‌تواند نوشته شود:

$$\zeta(\mathbf{r}, z, t) = \Phi(z)\zeta_s(\mathbf{r} - \mathbf{u}t) \quad (5)$$

در این رابطه ζ_s مکان عمودی منبع است. جابه‌جایی‌های مورد نظر به مدهای موجود در محیط بستگی دارد. شکل ۲ نحوه جابه‌جایی لایه‌ها را در دو مد اول نشان می‌دهد



شکل ۲. جابه‌جایی لایه‌های هم‌چگالی توسط امواج درونی - شکل بالا مد اول در محیط چینه‌بندی شده خطی و شکل پایین مد دوم در محیط چینه‌بندی شده غیرخطی است؛ در شکل بالا جمع‌شدگی و پراکنش امواج صوتی نسبت به جابه‌جایی لایه‌ها نشان داده شده است (رابرتز، ۱۹۷۵).

کاتسنسون و همکاران (۲۰۰۱)، کاتسنسون و پرسلکوو (۲۰۰۴) و لینچ و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی تأثیر امواج درونی بر روی انتشار امواج صوتی در یک کانال بزرگ است.

۲. روش کار

در محیط آزمایشگاهی یک کانال بسته شیشه‌ای با طول ۳۰۰، عرض ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر برپا شده است. ابعاد این کانال در مقایسه با مطالعات صورت گرفته چندین برابر بزرگ‌تر است. جنس ظرف از شیشه کریستال به ضخامت ۱۶ میلی‌متر می‌باشد که توسط حفاظ آهنی مهار شده است. سپس با استفاده از روش‌های معمول داخل ظرف به صورت یک محیط لایه‌بندی شده با فرکانس شناوری مشخصی آماده می‌شود. در چینه‌بندی محیط بسته به اینکه لایه‌بندی خطی یا غیرخطی باشد، به ترتیب از روش دو سطلی (double bucket) و تزریق آب شور از یک روزنه (filling box) (گریفیس و بیدختی، ۲۰۰۸) استفاده می‌شود.

در این تحقیق برای ایجاد چینه‌بندی خطی در محیط آزمایشگاهی با استفاده از روش دوسطلی از دو منبع پلاستیکی با ظرفیت ۷۵۰ لیتر استفاده شد. دو منبع با استفاده از یک لوله پلاستیکی به قطر یک اینچ و یک شیر به هم متصل شدند. خروجی منبع اول نیز با استفاده از یک لوله دیگر با همان قطر به داخل ظرف شیشه‌ای هدایت شد و در انتهای آن ابر ضخیمی کار گذاشته شد. منبع اول حاوی آب شور و منبع دوم از آب شیرین پر می‌شود؛ سپس شیر میان دو منبع باز می‌شود و با استفاده از یک همزن آب داخل منبع اول مخلوط شده و وارد ظرف شیشه‌ای می‌شود. با استفاده از این روش یک محیط چینه‌بندی شده خطی خواهیم داشت که از سطح آب با افزایش عمق، شوری نیز افزایش می‌یابد.

بر طبق گفته‌های مسئله به دنبال الگوی پرتو در یک بخش باریک زاویه خروج افقی پرتوها اطراف محور x هستیم. اگر مکان منبع ثابت فرض شود، در حالی که جبهه موج مسطح تک‌موج‌ها در راستای محور y حرکت می‌کنند، ضریب شکست با زمان تغییر می‌کند؛ بنابراین الگوی پرتو در صفحه افقی نیز تغییر می‌کند. فرض کنید بسته تک‌موج شکل کسینوسی با مقطع I_y داشته باشد:

$$\zeta_s(y - y_0) = \frac{\zeta_0}{2} \left\{ \cos \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (y - y_0) \right] \right\} \quad (7)$$

که در آن پارامتر λ طول موج، ω بسامد تک‌موج و ζ_0 دامنه تک‌موج است.

خصوصیات الگوی پرتو در صفحه افقی، به مکان بسته تک‌موج نسبت به مکان منبع وابسته است. اگر بسته بیرون از منبع باشد، الگوی پرتو در صفحه افقی، با واگرایی مرسوم استوانه‌ای پرتوهای افقی خطی مرتبط خواهد بود. وقتی که بسته منبع را می‌پوشاند، الگوی پرتو، به مکان منبع داخل بسته وابسته است. دو حالت محدود را در نظر بگیرید: منبع در محل مکان پیشینه و کمینه مقدار دامنه تک‌موج باشد، ζ_0 یا $\zeta_s = 0$. همچنین با وجود ωt در معادله v ، کمینه و بیشینه ζ_s نسبت به زمان و با بسامد ω در حال تغییر خواهد بود.

مورد اول مرتبط با مکان منبع در نقطه‌ای است که مقدار سرعت در آن کمینه است (با توجه به نزدیک‌ترین همسایگی در جهت y). در این مورد پرتوهای افقی وارد شده از منبع به علت شکست در جهت x منحرف می‌شوند. در مورد دوم، منبع در نقطه‌ای با بیشترین سرعت است و پرتوهای وارد شده از منبع به سمت دور شدن از محور x منحرف می‌شوند. هر دو مورد در شکل ۲ ارائه شده است که نتایج محاسبات برای چند مدل بسته تک‌موج را نشان می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده موج‌بر بودن در حالت اول و ضد موج‌بر بودن در حالت دوم است. در این زمینه می‌توان به مطالعات کاتسنسون و پرسلکوو (۲۰۰۰)،

مطالعه از یک جفت فرستنده و گیرنده آکوستیکی در فرکانس ۵۳ کیلوهرتز نیز استفاده شد. این فرستنده و گیرنده مطابق شکل ۶ بر روی دو پایه فلزی قرار می‌گیرند که با استفاده از نرم‌افزار طراحی شده قابلیت تنظیم ارتفاع را دارند. بر روی یکی از این پایه‌ها حسگر دما و هدایت الکتریکی نصب می‌شود و این پایه قابلیت حرکت عمودی با سرعت ثابت را دارد. داده‌های دما و شوری با استفاده از سامانه بلوتوثی به رایانه ارسال می‌شود و به صورت فایل متنی ذخیره می‌شود. این فرستنده و گیرنده صوتی یک بار قبل و یک بار پس از ایجاد امواج درونی در داخل ظرف به کار گرفته می‌شوند.

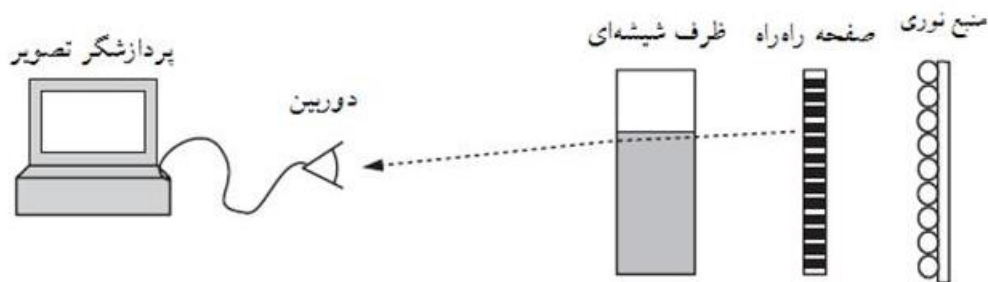
برای ایجاد امواج صوتی از یک دستگاه تولید کننده سیگنال مدل MFG-2205P استفاده شد. این دستگاه توانایی ایجاد سیگنال‌های با دامنه ۲۰ ولت و بسامد ۵GHz را دارد. همچنین برای دریافت سیگنال‌های صوتی از یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال مدل DS 1052E استفاده شد که قابلیت ثبت سیگنال‌ها را با نرخ داده برداری ۳۰ Msa/s دارد؛ این داده‌ها در یک حافظه جانبی ضبط می‌شوند.

خصوصیات فیزیکی امواج درونی ایجاد شده در داخل ظرف شیشه‌ای با استفاده از روش Synthetic Schlieren ثبت می‌شود. این روش به این صورت است که مطابق شکل ۴ منبع نور مستقیمی به ظرف شیشه‌ای تابانده می‌شود و یک صفحه شفاف راه‌راه مقابل منبع نوری و ظرف شیشه‌ای قرار می‌گیرد (دالزیل و همکاران، ۲۰۰۰).

برای ایجاد چینه‌بندی با نیم‌رخ قائم نمایی (بینز و ترنر، ۱۹۶۹) از یک پمپ پرستالیتیک با دبی ۱ تا ۳ لیتر بر ساعت استفاده می‌شود. خروجی پمپ پرستالیتیک به گونه‌ای در آب قرار می‌گیرد که فاصله مناسب با دیواره‌ها داشته باشد و تا ۵ سانتی‌متر در آب فرو رود. پمپ آب شور به داخل ظرف شیشه‌ای (بطور نمونه شار شناوری پلوم آب ورودی $F=g^2V=3/4 \times 10^{-7} m^4s^{-3}$ است) تا زمانی ادامه می‌یابد که جبهه تشکیل شده تا سطح آب برسد که معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ ساعت طول می‌کشد.

جهت ایجاد امواج درونی تاکنون روش‌های متفاوتی ارائه شده است (دوهان و سادرلند، ۲۰۰۵؛ آگویلارو همکاران، ۲۰۰۶) که در این مطالعه، امواج درونی با استفاده از یک نوسانگر عمودی ایجاد می‌شود. نوسانگر دارای یک موتور الکتریکی است که با استفاده از میلنگ و پیستون، حرکت دورانی آن تبدیل به حرکت رفت و برگشتی می‌شود. ارتفاع و دامنه نوسان کننده توسط پیچی که در بالای آن تعبیه شده است، قابل تنظیم می‌باشد. این نوسان‌ساز به یک رایانه متصل شده و با استفاده از نرم‌افزاری که برای آن تهیه شده است، بسامد نوسان آن نیز قابل تنظیم می‌باشد.

دامنه نوسان‌گر در حد چند میلی‌متر و فرکانس آن پس از تعیین فرکانس شناوری محیط تعیین می‌شود (با توجه به رابطه واپاشی داریم $\omega = N \cos \theta$ ؛ بنابراین $\omega \leq N$). تغییرات عمودی دما و شوری با استفاده از یک حسگر هدایت‌سنج الکتریکی و دماسنج، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. در این



شکل ۴. نحوه چیدمان آزمایشگاهی برای روش Synthetic Schlieren.

گرفت که در آن محیطی به شکل ۷ در نظر گرفته شد. این محیط با استفاده از قوانین بی‌بعدسازی طراحی شد (باون، ۱۹۹۳). در این مطالعه از روش حل KERAKENC که مبتنی بر روش مدهای نرمال می‌باشد، استفاده شده است.

۳. نتایج

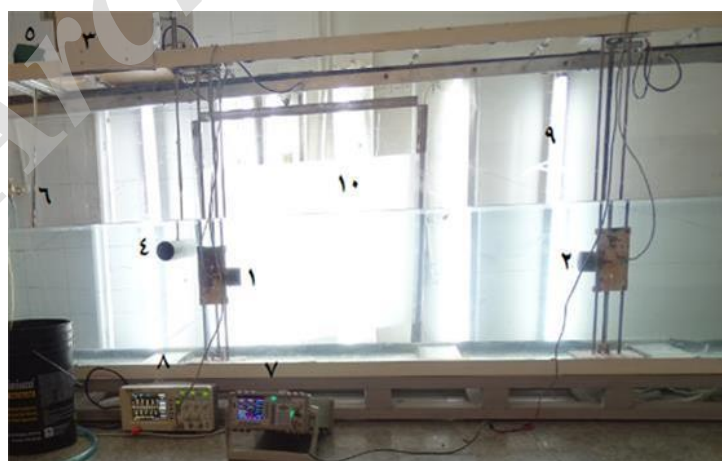
با استفاده از روش تزریق از روزنه و روش دو سطلی، محیطی با چینه‌بندی‌های غیرخطی و خطی مطابق شکل ۸ تشکیل شد. بعد از تشکیل امواج درونی، با استفاده از روش Synthetic Schlieren امواج درونی تشکیل شده در ظرف آزمایشگاهی شناسایی و ثبت شدند. خطوط رسم شده در شکل ۹ نشان‌دهنده جابه‌جایی سطوح هم‌چگالی یا همان امواج درونی است.

در طرف دیگر ظرف دوربینی جهت تصویربرداری در فاصله مناسب کار گذاشته می‌شود. به دلیل تفاوت ضریب شکست آب با چگالی‌های مختلف، پس از ایجاد امواج درونی، دوربین تصویری متفاوت با قبل از ایجاد امواج درونی ثبت می‌کند (شکل ۵). شمای کلی چیدمان آزمایشگاهی در شکل ۶ آورده شده است.

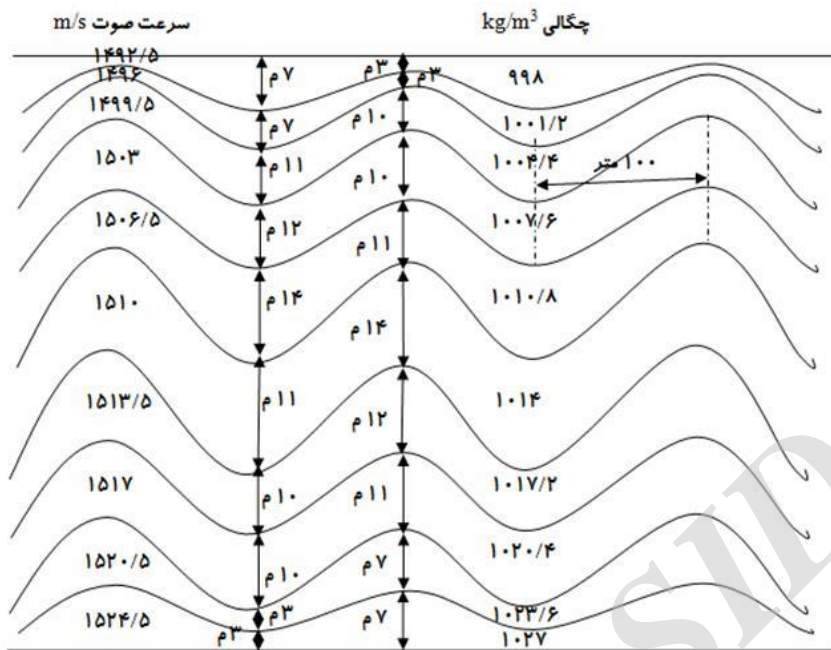
امواج درونی (مد ۱ و ۲) باعث نوسان در خطوط هم‌چگالی و در نتیجه شکست نور و ایجاد این الگو در تصویر نوری از میدان حرکت مربوط به عبور امواج درونی، شده است. نمونه طول موج این موج ۱۵ سانتی‌متر (۳ برابر قطر استوانه مولد موج) و فرکانس آن ۰/۱ بر ثانیه است. علاوه بر روش آزمایشگاهی، با استفاده از مجموعه کدهای ActUP v2.2L شبیه‌سازی آکوستیکی نیز صورت



شکل ۵. عکس سمت راست قبل از ایجاد امواج درونی و عکس سمت چپ پس از ایجاد امواج درونی



شکل ۶. شمای کلی چیدمان آزمایشگاهی؛ ۱. فرستنده صوتی ۲. گیرنده صوتی ۳. موج ساز ۴. نوسانگر استوانه‌ای ۵. پمپ پرستالتیک ۶. لوله تزریق آب شور ۷. تولیدکننده تابع موج ۸. اسکوپ دیجیتال ۹. چیدمان نوری ۱۰. پرده راه‌راه



شکل ۷. محیط معرفی شده به نرم افزار AcTUP v2.2L

شکل ۱۱ مربوط به فرستنده در حالت بیشینه ارتفاع موج و حالت ۷ جدول ۱ و شکل ۱۲ مربوط به فرستنده در حالت کمینه ارتفاع موج و حالت ۸ جدول ۱ می باشد.

۴. نتیجه گیری

اندازه گیری در حالت های ۱ و ۲ نشان می دهد به دلیل اینکه فرستنده و گیرنده روبه روی یکدیگرند، انتشار امواج صوتی در این حالت ها در محیط چینه بندی شده و محیط همگن فرق چندانی ندارد و این امر در حالت های ۳ و ۴ نیز مشهود است. در حالت های ۳ و ۴ نزدیکی فرستنده و گیرنده به سطح آب موجب اتلاف بیشتر امواج صوتی در مقایسه با حالت های ۱ و ۲ شده است. در حالت ۵ محیط غیرهمگن است و در مقایسه با حالت همگن دارای اتلاف بیشتری است که این نشان دهنده تأثیر چینه بندی بر روی انتشار امواج صوتی می باشد. همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، حالت ۵ بیشترین اتلاف را داشته است.

زاویه دو بیم خروجی از استوانه نشان دهنده انتشار امواج درونی است که در محیطی با بسامد شناوری ۰/۵ بر ثانیه و بسامد نوسان ۰/۳۶ بر ثانیه است. دامنه این امواج ۶ تا ۷ سانتی متر است و طول موج آن به ۱۵ سانتی متر هم می رسد. بسامد این امواج نیز با بسامد نوسانگر یکسان می باشد. لازم به ذکر است این شکل مربوط به حالت های ۷ و ۸ جدول ۱ است. سپس مطابق جدول ۱ در حالت های مختلف، امواج صوتی قبل و بعد از تشکیل امواج درونی، ارسال و دریافت شد که در شکل ۱۰ آورده شده است.

بعد از تشکیل امواج درونی در محیط، دامنه امواج صوتی به طور متناوب کم و زیاد می شد که حالت ۷ شکل ۱۰ کمترین دامنه امواج صوتی و حالت ۸ شکل ۱۰ بیشترین دامنه امواج صوتی را نشان می دهد که دامنه امواج صوتی بین این دو دامنه با بسامد امواج درونی نوسان می کند.

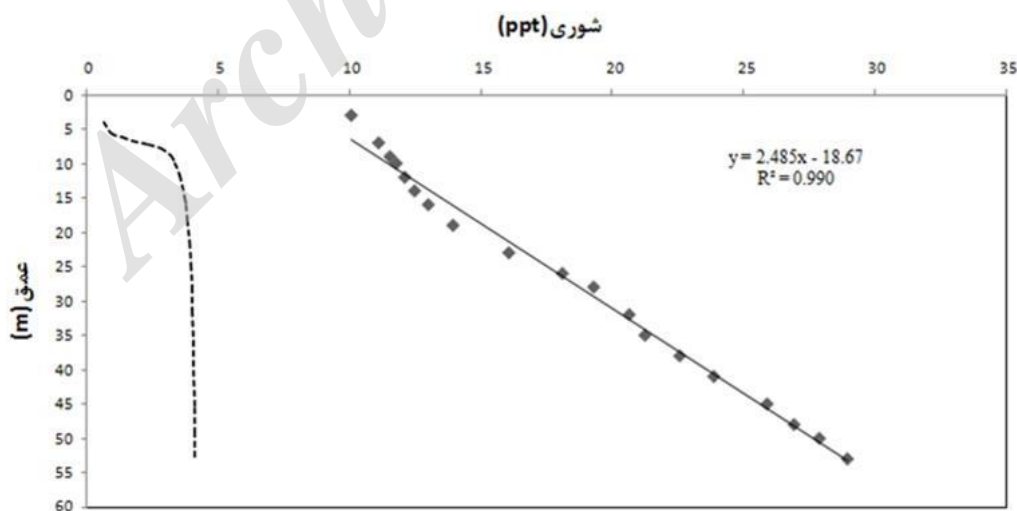
خروجی مدل صوتی (برای شرایط مشابه ۷ و ۸ آزمایش ها) نیز در شکل های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای آزمایش‌ها

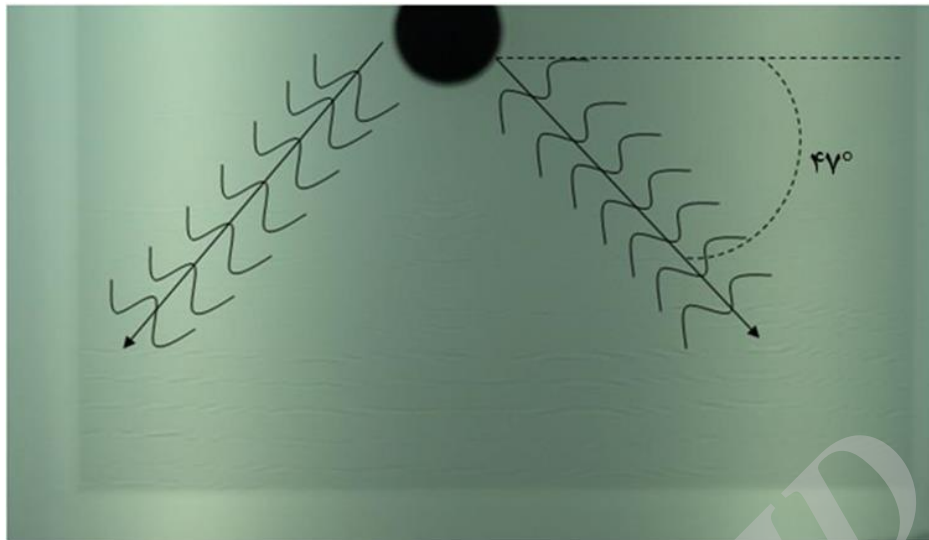
عنوان آزمایش	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸*
بسامد نوسانگر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۷	۰/۰۷ هرتز
بسامد فرستنده و گیرنده صوتی	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز	۵۳ کیلو هرتز
عمق فرستنده (ف) و گیرنده (گ) (سانتی‌متر)	ع ف = ۲۸ ع گ = ۲۸	ع ف = ۲۸ ع گ = ۲۸	ع ف = ۱۱ ع گ = ۱۱	ع ف = ۱۱ ع گ = ۱۱	ع ف = ۲۸ ع گ = ۱۱	ع ف = ۲۸ ع گ = ۱۱	ع ف = ۲۰ ع گ = ۲۰	ع ف = ۲۰ ع گ = ۲۰
فاصله فرستنده و گیرنده (سانتی‌متر)	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۰	۱۱۰
عمق استوانه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۸
ولتاژ اندازه‌گیری شده (V.p.p)**	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۰۹	۰/۲۵۲	۰/۱۲۴	۰/۲۶۸
ولتاژ اندازه‌گیری شده در فاصله ۱۰ سانتی‌متری محیط همگن	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۲/۴	۲/۴
چینه‌بندی	غیرخطی	ندارد	غیرخطی	ندارد	غیرخطی	ندارد	غیرخطی	غیرخطی
عمق آب (سانتی‌متر)	۵۸/۵	۵۸/۵	۵۸/۵	۵۸/۵	۵۸/۵	۵۸/۵	۴۹	۴۹
در محل فرستنده	۰/۰۲	۰	۰/۱	۰	۰/۰۲	۰	<۰/۰۱	<۰/۰۱
در محل گیرنده	۰/۰۲	۰	۰/۱	۰	۰/۱	۰	<۰/۰۱	<۰/۰۱

* حالت ۸ همان حالت ۷ بعد از گذشت ۱۰ ثانیه است.

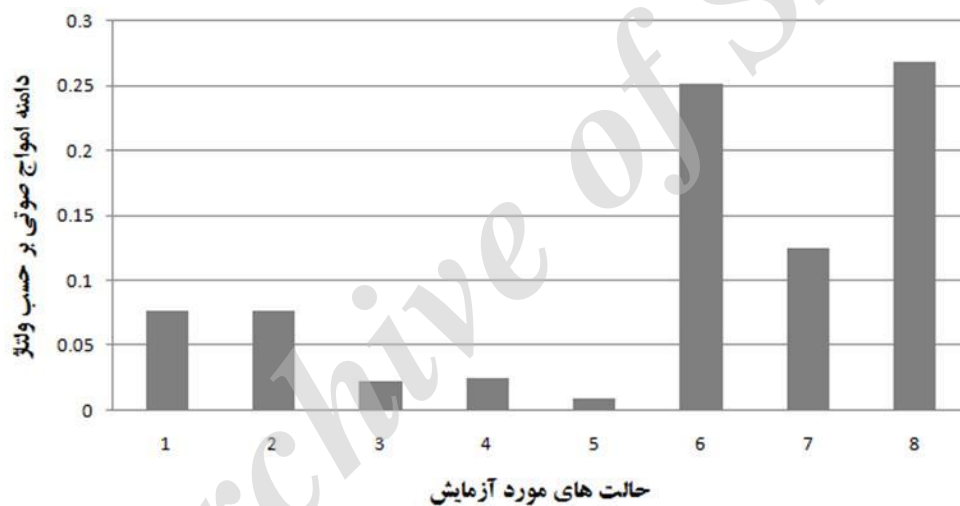
** ولتاژ اندازه‌گیری شده مربوط به عدد اسکوپ می‌باشد که گیرنده به آن متصل شده و نمایانگر شدت صوتی است و مقداری نسبی دارد.



شکل ۸. چینه‌بندی خطی و غیرخطی ایجاد شده با روش‌های دو سطحی (نیمرخ خطی) و تزریق از روزنه (عمق ۱۰ cm) (غیرخطی)



شکل ۹. امواج درونی تشکیل شده در محیط آزمایشگاهی، راستای فلش جهت سرعت گروه است.



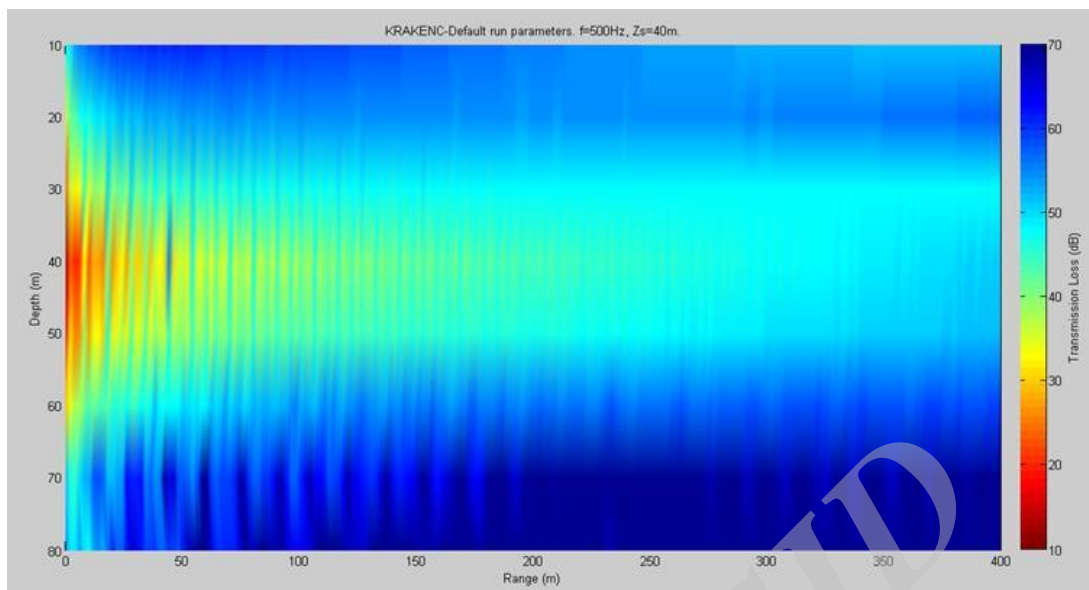
شکل ۱۰. نمودار ارتفاع امواج صوتی دریافتی حالت های جدول ۱ بر حسب ولتاژ

غیرآدیاباتیکی بودن انتشار امواج صوتی به دست می آید (ژو و همکاران ۱۹۹۱؛ پریسیگ و دودا، ۱۹۹۷؛ وارن و ارناس و همکاران، ۲۰۰۳).

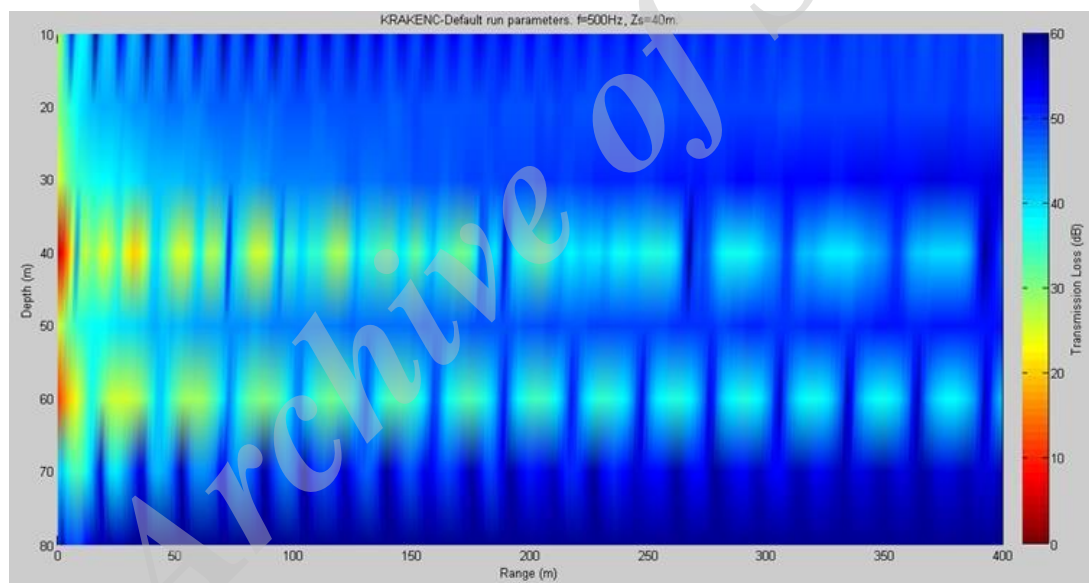
۲. جمع شدگی و پراکنش (focusing and defocusing) امواج صوتی: بر خلاف مورد قبل این پدیده مختص فرکانس خاصی نمی باشد و به جابه جایی های بیشینه و کمینه سطوح همچگالی ناشی از امواج درونی بستگی دارد.

اندازه گیری امواج صوتی در حالت های ۷ و ۸ در حضور امواج درونی صورت گرفته است. با توجه به منابع موجود تأثیر امواج درونی بر روی انتشار امواج صوتی را به دو صورت می توان در نظر گرفت:

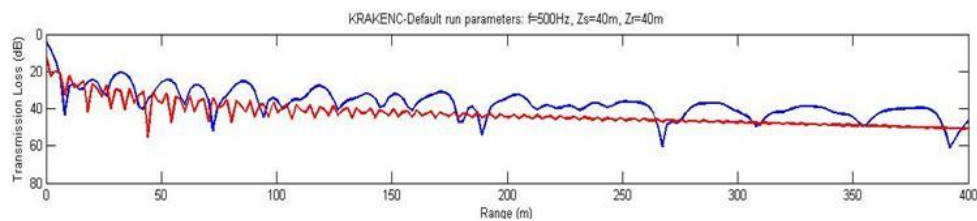
۱. پدیده جفت شدگی مدها: در این پدیده که معمولاً در یک یا چند فرکانس خاص به وجود می آید، اتلاف امواج صوتی چندین برابر سایر فرکانس هاست و دلیل آن هم اتلاف انرژی بین انتقال مدها می باشد. روابط آن با فرض



شکل ۱۱. نمودار اتلاف عبوری صوت - فرستنده در حالت بیشینه ارتفاع موج (حالت ۷)



شکل ۱۲. نمودار اتلاف عبوری صوت - فرستنده در حالت کمینه ارتفاع موج (حالت ۸)



شکل ۱۳. مقایسه بین دو حالت ۷ و ۸؛ رنگ قرمز در حالت بیشینه ارتفاع موج (حالت ۷) و رنگ آبی در حالت کمینه ارتفاع موج (حالت ۸).

و پرسلکوو (۲۰۰۰)، کاتسنسون و همکاران (۲۰۰۱)، کاتسنسون و پرسلکوو (۲۰۰۴)، لینچ و همکاران (۲۰۱۰) نتایج این مطالعه را تأیید می‌کنند.

باون در مطالعه‌ای در سال ۱۹۹۳ به رابطه $ka = k'a'$ اشاره کرده است. این رابطه بیان دارد که اگر پدیده‌ای با ابعاد a در محیط دریا با بسامد k قابل آشکارسازی باشد، با ابعاد a' در محیط آزمایشگاهی با بسامد k' قابل آشکارسازی می‌باشد. با توجه به این رابطه می‌توان انتظار داشت که مشابه تأثیری که امواج درونی با ارتفاعی از مرتبه ۱۰ سانتی‌متری در محیط شبیه‌سازی شده بر روی امواج صوتی با بسامد ۵۳ کیلوهرتز دارد، در محیط واقعی با ارتفاع امواج درونی از مرتبه ۱۰ متر، تأثیر آن بر فرکانس ۵۰۰ هرتز محسوس‌تر خواهد بود. و این در حالی است که کارهای صورت گرفته در خصوص تأثیر امواج درونی بر روی انتشار امواج صوتی در محیط واقعی در حد ۳۰۰ تا ۴۰۰ هرتز گزارش شده است (مانک و همکاران، ۱۹۸۱؛ اسکوتی و پیندا، ۲۰۰۴؛ رانتکو، ۲۰۰۵؛ تورگونت و پاسوارک، ۲۰۰۷؛ مورگانو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ریدر و همکاران، ۲۰۰۸؛ لینچ و همکاران، ۲۰۱۰).

مراجع

- Aguilar, D., Sutherland, B.R. and Muraki, D.J., 2006, Laboratory generation of internal waves from sinusoidal topography, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(1), 96-115.
- Baines, W. D. and Turner, J. S., 1969, Turbulent buoyant convection from a source in a confined region, *J. Fluid Mech.*, 37, 51-80.
- Bowen, S. G., 1993. Forward scattering of a pulsed continuous wave signal through laminar and turbulent thermal plumes. MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE.
- Dalziel, S.B., Hughes, G.O. and Sutherland, B.R., 2000, Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren', *Experiments in Fluids*, 28(4), 322-335.
- Dohan, K. and Sutherland, B., 2005, Numerical and laboratory generation of internal waves from turbulence, *Dynamics of atmospheres and*

جابه‌جایی ترموکلاين توسط امواج درونی شکل می‌گیرد و بسامد جابه‌جایی آن نیز با بسامد امواج درونی یکسان است. علت این نوسان جمله ωt در معادله (۷) می‌باشد.

پس با توجه به مشاهدات صورت گرفته در آزمایشگاه می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات متناوب دامنه امواج صوتی اندازه‌گیری شده به دلیل جابه‌جایی ترموکلاين لایه‌های هم‌چگالی تشکیل شده در محیط آزمایشگاهی است و پدیده جفت شدگی مدها در این فرایند نقشی ندارد. این اثر در نتایج مدل عددی آکوستیکی، همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ آورده شده است، نیز قابل مشاهده است. شکل ۱۲ نشان‌دهنده موجبر شدن محیط برای امواج صوتی یا همان حالت focusing است. اتلاف امواج صوتی در این حالت کمتر از حالت شکل ۱۱ است. در شکل ۱۳ اتلاف امواج صوتی در دو حالت نسبت به برد نشان داده شده است. اتلاف (با پراکندگی) در نتیجه وجود امواج درونی می‌تواند تا ۵۴ درصد همانند شکل ۱۰ باشد. این نتایج با نتایج مطالعات تجربی در محیط واقعی هم‌خوانی دارد که می‌توان به کارهای رابنستین (۱۹۹۹) در فلات قاره فلوریدا واقع در خلیج مکزیک و لینچ و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. همچنین مطالعات تئوری همچون کاتسنسون

- oceans, 40(1), 43-56.
- Gostiaux, L. and Dauxois, T., 2007, Laboratory experiments on the generation of internal tidal beams over steep slopes, *Physics of Fluids (1994-present)*, 19(2), 028102.
- Griffiths, R. W. and Bidokhti, A. A., 2008, Interleaving intrusions produced by internal waves: a laboratory experiment, *Journal of Fluid Mechanics*, 602, 219-239.
- Katsnel'son, B. and Pereselkov, S., 2004, Space-frequency dependence of the Horizontal structure of a sound field in the presence of intense internal waves, *Acoustical Physics*, 50(2), 169-176.
- Katsnel'son, B. and Pereselkov, S., 2000, Low-frequency horizontal acoustic refraction caused by internal wave solitons in a shallow sea, *Acoustical Physics*, 46(6), 684.
- Katsnel'son, B. G., Pereselkov, S.A., Petnikov,

- V.G., Sabinin, K.D., and Serebryanyi, A.N., 2001, Acoustic effects caused by high-intensity internal waves in a shelf zone, *Acoustical Physics*, 47(4), 424-429.
- Lynch, J. F., Lin, Y.T., Duda, T. F. and Newhall, A. E., 2010, Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* , 35(1), 12-27.
- Mathur, M. and Peacock, T., 2009, Internal wave beam propagation in non-uniform stratifications, *Journal of Fluid Mechanics*, 639, 133-152.
- Morgunov, Y. N., Polovinka, Y. A. and Stroykin, D.S., 2008, an experimental study of the effect of tide on acoustic field formed along a stationary track in the shelf zone of the Sea of Japan, *Acoustical Physics*, 54(4), 506-507.
- Munk, W., Zetler, B., Clark, J., Gill, S., Porter, D., Spiesberger, J. and Spindel, R., 1981, Tidal effects on long-range sound transmission, *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 86(C7), 6399-6410.
- Preisig, J. C. and Duda, T. F., 1997, Coupled acoustic mode propagation through continental-shelf internal solitary waves, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* , 22(2), 256-269.
- Pond, S. and Pickards, G. L., 1983, *Introductory Dynamical Oceanography*, Butterworth and Heineman Ltd., 328 pp.
- Reeder, D. B., Duda, T.F. and Ma, B., 2008, Short-range acoustic propagation variability on a shelf area with strong nonlinear internal waves, *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, IEEE.
- Roberts, J., 1975, Internal gravity waves in the ocean, *Alaska Univ College Inst Of Marine Science*.
- Ross, T. and Lavery, A., 2009, Laboratory observations of double-diffusive convection using high-frequency broadband acoustics, *Experiments in Fluids*, 46(2), 355-364.
- Rubenstein, D., 1999, Observation of cnoidal internal waves and their effect on propagation in shallow water, *IEEE J. Ocean Eng.*, 24(3), 346-357.
- Rutenko, A., 2005, The effect of internal waves on the sound propagation in the shelf zone of the sea of Japan in different seasons, *Acoustical Physics*, 51(4), 449-456.
- Scotti, A. and Pineda, J., 2004, Observation of very large and steep internal waves of elevation near the Massachusetts coast, *Geophysical research letters*, 31(22).
- Sutherland, B. and Linden, P., 2002, Internal wave excitation by a vertically oscillating elliptical cylinder, *Physics of Fluids (1994-present)*, 14(2), 721-731.
- Thorpe, S. A., 2005, *The turbulent ocean*, Cambridge University Press, pp 230.
- Turgut, A., Orr, M. and Pasewark, B., 2007, Acoustic monitoring of the tide height and slope-water intrusion at the New Jersey Shelf in winter conditions, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5), 2534-2541.
- Warn-Varnas, A.C., Chin-Bing, S.A., King, D.B., Hallock, Z. and Hawkins, J.A., 2003, Ocean-acoustic solitary wave studies and predictions, *Surveys in Geophysics*, 24(1), 39-79.
- Zhou, J. X., Zhang, X.Z. and Rogers, P. H., 1991, resonant interaction of sound wave with internal solitons in the coastal zone, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(4), 2042-2054.

A laboratory study of the effect of internal waves on acoustic propagation

Deldar, H.¹, Aliakbari-Bidokhti, A.^{2*}, Chegini, V.³ and Akbarinasab, M.⁴

1. Ph.D. Student, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

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

3. Assistant Professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Marine Sciences Department, University of Mazandaran, Iran

(Received: 28 Jan 2016, Accepted: 24 Jan 2017)

Summary

For calculating the acoustic pressure due to sound propagation at sea using usual methods (pressure variations signals), knowing the density distribution and consequently, changes the speed of sound in the environment is very important. Many environmental factors affect the distribution of the density at sea, depending on environmental conditions and geographic locations and the weaknesses of each of them are different. One of them is internal waves which usually cause temporal and spatial changes and consequently affect the acoustic wave propagation in the ocean. Internal waves can be generated by tidal currents over sea floor sloping that is very common in the stratified oceans. Results of study in some researches showed that internal waves can affect the sound waves in two ways: 1-Internal waves can decrease sound level up to 25 dB due to sound mode coupling in an exact frequency. 2- Internal waves can focus and defocus sound waves because of sound speed fluctuation. The purpose of this study is a laboratory investigation of internal waves caused by oscillation of a cylinder in a stratified glass channel with 3 meters long, 0.5 meter width and 1 meter height, on the sound waves propagation. In this study, using the double bucket and filling box method for generating stratification that is measured by one pair of salinity and temperature meters fixed on a rail that can move up and down. Using the usual methods of setting up internal waves and using acoustical transducers in 53 kHz frequency, internal wave's effects on the propagation of sound waves, were investigated. In this study with usual optical method (Synthetic Schlieren) the internal waves generated in the tank can be detected. In this method internal wave generated in the glass tank change optical index of water layers and caused deviation of the image straight lines designed on the back of tank. Laboratory results showed that sound waves can be focused and defocused due to the normal modes of internal waves. Some 9 experiments were done mainly in cases with vertical linear density stratified fluid. As the modal structure of internal waves in the water tank change due to the waves, constant density surfaces change slopes, hence changing the sound ray's paths and the amount of signals reaching the receivers. Similar results of numerical simulation also show similar behavior in the strength of the acoustic signal. The numerical simulation were done by AcTUP v2.2L software that use KERAKENC method based on normal mode method. The acoustic signal can be weakened up to 54 per cent depending on the degree of sound ray divergence. We can conclude that in the laboratory tank in this study internal waves can affect the sound waves by focusing and defocusing and not by mode coupling. Similar behaviors can be expected in the open ocean as the existence of internal waves is ubiquitous. For this goal dimensionless numbers should be use. Bowen (1993) showed that for simulating a sound waves interaction with a phenomenon in laboratory scale we can use $k'a'$. With this formula we can compare laboratory results with real results in oceans.

Keywords: Internal waves, Propagation of sound waves, Focusing and defocusing of sound waves, Sound waves, Simulation.

*Corresponding author:

bidokhti@ut.ac.ir