

شبیه سازی کامپیوتری انتشار امواج صوتی در دریای خزر

آرش گوران اوریمی، افشین محسنی آراسته*

گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

آکوستیک محاسباتی که یکی از شاخه‌های برجسته آکوستیک زیر آبی می باشد، امروزه به عنوان یک شاخه اساسی در آزمایشگاه‌های پیشرفته‌ی جهان نقش آفرینی می نماید. اهمیت این شاخه بواسطه صرفه جویی در هزینه‌های بسیار بالای آزمون‌های عملیاتی در آب می‌باشد. روش‌های عددی زیادی تاکنون در این شاخه، پا به عرصه‌ی وجود نهاده‌اند که از آن‌ها تنها روش‌های پرتو، مدهای عادی، میدان سریع و معادلات سهموی مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند. روش معادلات سهموی، یک روش مناسب برای فرکانس‌های کم و آبهای کم عمق می‌باشد و تقریباً برای همه محیط‌ها روشی قابل اعتماد می‌باشد.^(۱) بنابر اهمیت مطالعه انتشار صوت در آبهای دریای خزر، در این مقاله، با استفاده از روش معادلات سهموی و از زبان برنامه نویسی ++C و نرم افزار MATLAB برای شبیه سازی انتشار صوت در این دریا استفاده نموده ایم. به دلیل وجود پیچیده‌گی‌های علمی موجود در چگونگی وارد نمودن اثر بسیاری از پارامترها، در برنامه رایانه ای مذکور، حالت‌های کلی را برای برخی از پارامترهای مهم نظیر عمق و فرکانس منبع، برد گیرنده و عمق کل شبیه‌سازی در نظر گرفته ایم. نتایج حاصل از این شبیه سازی نشان می دهند که تاثیر انعکاس‌های مربوط به بستر و سطح دریا از برد ۴۵۰۰ متر آغاز می شود. مقدار خطای اتلاف انتقال حدود ۱۸/۴ درصد برآورد شده و با بالابردن توان تابش از ۲۰۰ دسی بل می توان اثر نوفه را در طول انتشار، حذف نمود. تعیین میزان اتلاف انتقال نیز در ایستگاه‌های ۱ الی ۴ دریای خزر با استفاده از این شبیه سازی در شکل‌های ۲، ۶، ۸ و ۱۰ نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: امواج آکوستیکی، شبیه سازی، معادله سهموی

* عهده دار مکاتبات

مقدمه

شبیه سازی عددی، مهمترین مرحله در یک کار تحقیقاتی در جهت کنترل درستی نتایج بدست آمده محسوب می گردد. تجربیات آزمایشگاهی به دلیل وجود هزینه های بسیار بالای آزمون های عملیاتی، که به دقت نمونه برداری و دستگاه های اندازه گیری بستگی دارد، به ویژه در آکوستیک محاسباتی از اهمیت خاصی برخوردارند که در این میان، استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز پدیده های زیرسطحی، از جایگاهی بالا برخوردار می باشند. ارائه نرم افزاری جامع برای شبیه سازی انتشار امواج آکوستیکی در آب دریا، به عوامل زیادی بستگی دارد که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می شود:

- شناخت کامل فراسنج های مهم محیطی
- استفاده از مدل ریاضی مناسب که بیشترین بهره از ماهیت فیزیکی پدیده را در برداشته باشد
- شناخت پارامترهای موجود در مدل ریاضی و چگونگی وارد نمودن آنها در شبیه سازی
- انتخاب روش مناسب حل، از دیدگاه عددی یا تحلیلی
- آزمایش و مقایسه نتایج بدست آمده از مدل گسسته شده مسئله

اولین و مهم ترین مرحله در یک شبیه سازی، شناخت فراسنج های محیطی است. زیرا از این مرحله به عنوان ابزاری جهت بدست آوردن مدل ریاضی پدیده های فیزیکی استفاده می شود. پارامترهای زیادی در مدل سازی ریاضی یک الگوی طبیعی دخالت دارند که وارد نمودن تمامی آنها به طور هم زمان، با توجه به دانش کنونی ممکن نمی باشد. از اینرو ممکن است با توجه به درجات آزادی مختلف، مدل های ریاضی مختلفی از یک پدیده وجود داشته باشد. در این میان، مدلهایی قابل قبول هستند که از یک سو پارامترهای فیزیکی بیشتری را مدل نمایند و از طرف دیگر نتایج حاصل از آنها با الگوی طبیعی تطابق داشته باشند. مدل های موجود در آکوستیک محاسباتی از ویژگی های مدلی مناسب برخوردار بوده و هر یک در شرایط محیطی خاص خود مناسب می باشد.

در تمامی این مدل ها، پارامترهای سرعت، عدد موج، فرکانس، عمق و برد و ارتباط آنها با یکدیگر، ویژگی های منبع صوتی، نوع محیط از دیدگاه مکانیک سیالات (از لحاظ تراکم پذیری یا تراکم ناپذیر بودن سیال)، وجود جریان های آب به صورت محیطی تصادفی، محیط های آبی وابسته به برد، انواع نوفه های محیطی (از قبیل نوفه ی کشتی ها، زیر دریایی ها، ماهیان، اجسام شناور، باد، جزر و مد و ...)، شرایط زمین شناختی بستر دریا (از قبیل پستی و بلندی ها، جنس، تعداد لایه های بستر و ...)، حالت سطح دریا و سرانجام نوع محیط (از لحاظ کم عمق و عمیق بودن)، دخیل می باشند. از میان پارامترهای فوق، چگونگی وضعیت بستر و سطح دریا و جنس بستر از اهمیت خاصی برخوردارند.^(۲)

در مدل آب عمیق با منبعی در فاصله ای دور از سطح و بستر، بسیاری از پارامترهای ذکر شده فوق، تاثیر مستقیم خود را از دست می دهند. به عنوان مثال، انعکاس، پخش و چرخش پرتوهای موج آکوستیکی به طور ضمنی حذف می شوند. در آب های کم عمق با پیچیدگی زیادتری مواجه می باشیم.

در آب های کم عمق بدلیل نزدیکی مرزهای سطح و بستر، تأثیر تمامی پارامترهای ذکر شده فوق، در شبیه سازی وارد می شوند. از این رو برخی از روش ها از جمله روش های مبتنی بر انتشار پرتوها، کارایی خود را از دست می دهند.

روش مدهای عادی، میدان‌های سریع و معادلات سهموی برای گسسته‌سازی معادله انتشار موج آکوستیکی بسیار مناسب می‌باشند.^(۳)

مواد و روشها

نظر به اهمیت بررسی انتشار امواج آکوستیکی در آبهای کم عمق، در مقاله حاضر، از روش معادلات سهموی برای شبیه‌سازی عددی محدوده‌های آبی دریای خزر استفاده شده است. در روش معادلات سهموی، ابتدا معادله‌ی هذلولوی موج با توجه به ویژگی‌های محیطی، به معادله‌ی سهموی تبدیل شده سپس معادله‌ی سهموی جدید به دو قسمت پیش‌رونده و پس‌رونده تجزیه می‌شود و از روش تفاضلات محدود ترکیبی نیز، برای گسسته‌سازی مدل معادلات سهموی استفاده می‌شود.^(۴)

با توجه به پیچیده‌گی‌های گسسته‌سازی، تنها پارامترهای زیر در شبیه‌سازی اعمال شده است:

- عمق نهایی محیط

- برد نهایی محیط

- عمق منبع

- فرکانس منبع

- عمق گیرنده

- چگالی آب

شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری مقاله به زبان برنامه‌نویسی C++ و با نرم افزار MATLAB انجام شده است. با توجه به انتخاب تعداد نقاط گسسته‌سازی عمق و برد و حجم شدن ماتریس‌های محیطی، نرم‌افزار MATLAB در زمان نسبتاً زیادی عمل پردازش را انجام می‌دهد که براساس آزمون‌های به‌عمل آمده، زبان C++ همین پردازش را با تقریباً ۱۰ برابر سرعت انجام می‌دهد. اما دلیل به‌کارگیری MATLAB، برخورداری از جعبه‌ی گرافیکی قدرتمند این نرم افزار در رسم نمودارها و شکل‌ها می‌باشد.

با استفاده از داده‌های مربوط به گشت دریایی دریای خزر در تابستان سال ۱۹۹۶، خروجی نرم‌افزار را برای چند ایستگاه دریای خزر به دست آورده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی بدست آمده در مقایسه با نتایج مدل‌های معروف در مورد آبهای کم عمق^(۲) قابل قبول می‌باشند، هرچند که از تضعیف بستر صرف‌نظر شده است. اطلاعات مربوط به ۲۸ ایستگاه دریای خزر دارای مشخصات زیر می‌باشند:^(۵)

۱- طول و عرض جغرافیایی هر ایستگاه؛ ۲- تاریخ و زمان ثبت اطلاعات؛ ۳- عمق، دما و شوری محیط در یک برد خاص؛

جدول (۱)، اطلاعات مربوط به ایستگاه اول با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $50/792^{\circ}E$ و $37/550^{\circ}N$ که در تاریخ ۱۹۹۶/۰۸/۳۰ در ساعت ۱۲ برای ناحیه ای به عمق ۸۴۴ متر بدست آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ایستگاه اول

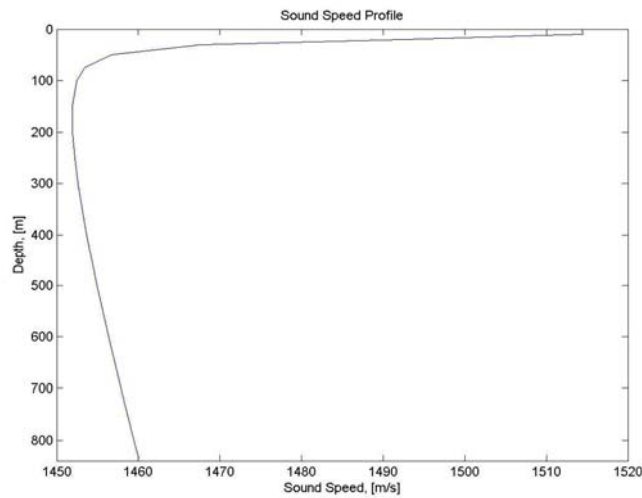
عمق (m)	دما (°C)	شوری (ppt)	تاریخ
۰	۲۶/۸۱	۱۲/۴۱	۱۹۹۶/۸/۳۰
۱۰	۲۶/۸	۱۲/۳۸	۱۹۹۶/۸/۳۰
۲۰	۱۸/۷۶	۱۲/۵۴	۱۹۹۶/۸/۳۰
۳۰	۱۱/۴	۱۲/۳۷	۱۹۹۶/۸/۳۰
۵۰	۸/۳۷	۱۲/۵۹	۱۹۹۶/۸/۳۰
۷۵	۷/۴۲	۱۲/۷۱	۱۹۹۶/۸/۳۰
۱۰۰	۷/۰۷	۱۲/۷۷	۱۹۹۶/۸/۳۰
۱۵۰	۶/۷۲	۱۲/۸۴	۱۹۹۶/۸/۳۰
۲۰۰	۶/۵۲	۱۲/۸۹	۱۹۹۶/۸/۳۰
۲۵۰	۶/۳۸	۱۲/۹۲	۱۹۹۶/۸/۳۰
۳۰۰	۶/۲۸	۱۲/۹۴	۱۹۹۶/۸/۳۰
۴۰۰	۶/۱۳	۱۲/۹۷	۱۹۹۶/۸/۳۰
۵۰۰	۶/۰۶	۱۲/۹۹	۱۹۹۶/۸/۳۰
۶۰۰	۶/۰۱	۱۳	۱۹۹۶/۸/۳۰
۷۰۰	۵/۹۹	۱۳/۰۱	۱۹۹۶/۸/۳۰
۸۰۰	۵/۹۸	۱۳/۰۱	۱۹۹۶/۸/۳۰
۸۳۵/۴	۵/۹۸	۱۳/۰۱	۱۹۹۶/۸/۳۰

مقادیر سرعت صوت را برای این ایستگاه، با استفاده از معادله (۱) ^(۶)، بدست آورده ایم که در جدول ۲ ارائه شده اند و تغییرات سرعت صوت را نسبت به عمق نیز در شکل (۱) نمایش داده ایم.

$$c=1449.2+4.6T-0.055T^2+0.00029T^3+(1.34-0.01T)(S-35)+0.016z. \quad (۱)$$

جدول ۲: سرعت صوت بر حسب عمق در ایستگاه شماره ۱ دریای خزر.

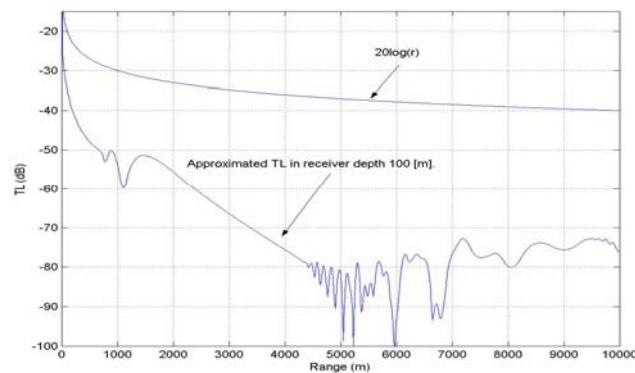
عمق (m)	سرعت صوت (m/s)	عمق (m)	سرعت صوت (m/s)
۰	۱۵۱۴/۴	۲۵۰	۱۴۵۲/۲
۱۰	۱۵۱۴/۵	۳۰۰	۱۴۵۲/۶
۲۰	۱۴۹۲/۵	۴۰۰	۱۴۵۳/۶
۳۰	۱۴۶۷/۷	۵۰۰	۱۴۵۵/۰
۵۰	۱۴۵۶/۷	۶۰۰	۱۴۵۶/۴
۷۵	۱۴۵۳/۷	۷۰۰	۱۴۵۷/۹
۱۰۰	۱۴۵۲/۵	۸۰۰	۱۴۵۹/۵
۱۵۰	۱۴۵۱/۹	۸۳۵/۴	۱۴۶۰/۰
۲۰۰	۱۴۵۱/۹		



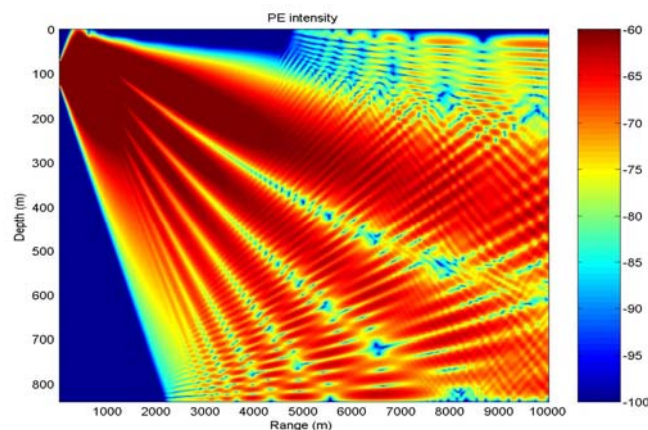
شکل ۱: نیمرخ سرعت صوت در ایستگاه شماره ۱ دریای خزر.

نتایج و بحث

با توجه به منحنی (۱)، کانال صوتی را در عمق حدود ۹۰ متر مشاهده می‌کنیم. در شکل (۲)، مقایسه‌ای بین اتلاف انتقال، برای الگوی کلی انتشار کروی و خروجی حاصل از مدل انجام شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که تاثیر انعکاس‌های مربوط به سطح و بستر، از برد ۴۵۰۰ متری آغاز می‌شود. در این وضعیت، منبع صوتی در عمق ۱۰۰ متر قرار گرفته، فرکانس صوت آن ۲۰۰ هرتز بوده و شبیه‌سازی انتشار صوت نیز تا برد ۱۰ کیلومتری انجام شده است. در شکل (۳) شبیه‌سازی انتشار برای همین شرایط، نشان داده شده است.

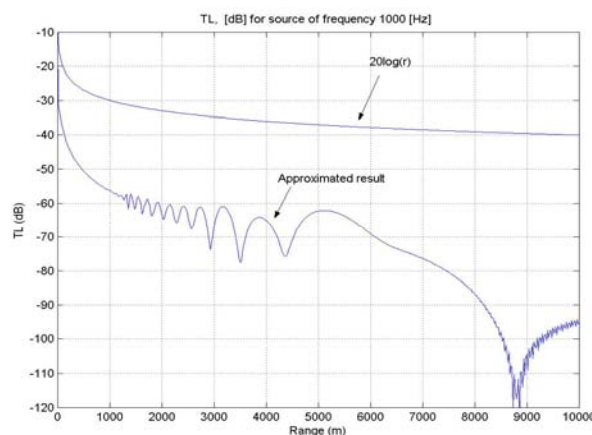


شکل ۲: اتلاف انتقال برای منبع و گیرنده‌ای در عمق ۱۰۰ متر با فرکانس ۲۰۰ Hz در ایستگاه شماره ۱ دریای خزر



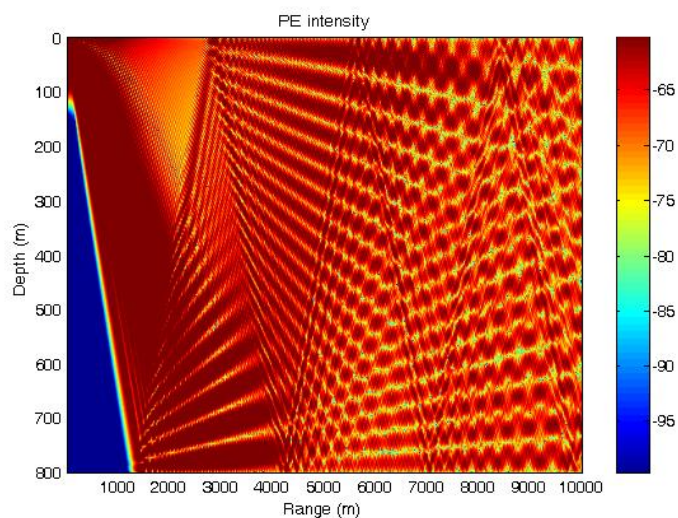
شکل ۳: خروجی نرم افزار از نحوه ی انتشار موج آکوستیکی برای منبع و گیرنده ای در عمق ۱۰۰ متر با فرکانس ۲۰۰Hz در ایستگاه شماره ۱ دریای خزر .

حال برای محیطی با چنین ویژگی هایی، فرکانس منبع صوتی را تغییر داده و همانگونه که با توجه به مکانیزم تضعیف محیطی فرکانس انتظار داریم، اتلاف انتقال با افزایش فرکانس افزایش می یابد. در شکل (۴)، این تغییر برای فرکانس ۱ کیلوهرتز نشان داده شده است.

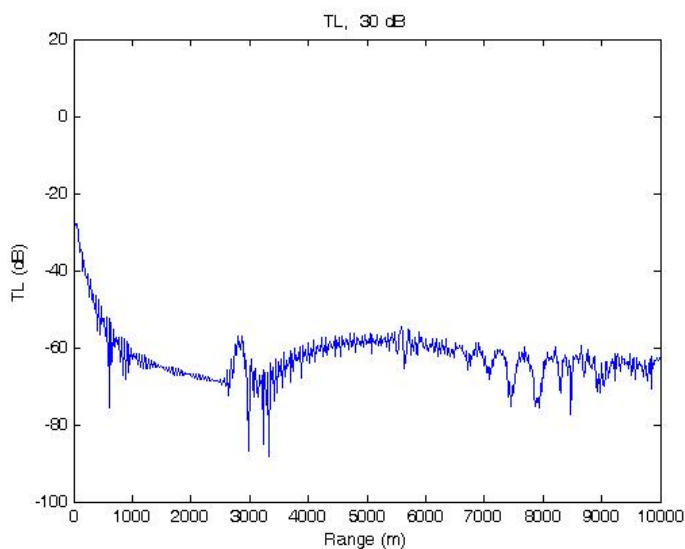


شکل ۴. اتلاف انتقال برای منبع و گیرنده ای در عمق ۱۰۰ متر و فرکانس ۱ کیلوهرتز در ایستگاه شماره ۱ دریای خزر.

شکل (۵) الگوی انتشار موج بدست آمده از مدل را در ایستگاه شماره ۲ دریای خزر با طول جغرافیایی $50^{\circ}148'E$ و عرض جغرافیایی $41^{\circ}35'N$ تا برد ۱۰ کیلومتر نمایش می دهد. در این حالت، منبع در عمق ۵ متری از سطح دریا قرار داشته و فرکانس صوت آن ۵۰Hz است. شکل (۶) نیز اتلاف انتقال این منبع را در عمق ۳۰ متری نمایش می دهد.

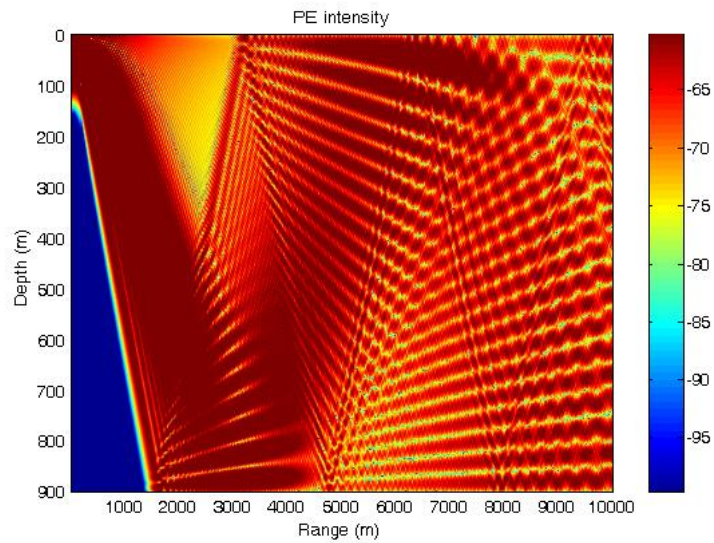


شکل ۵: انتشار موج از منبعی در عمق ۵ متری با فرکانس ۵۰ Hz در ایستگاه شماره ۲ دریای خزر

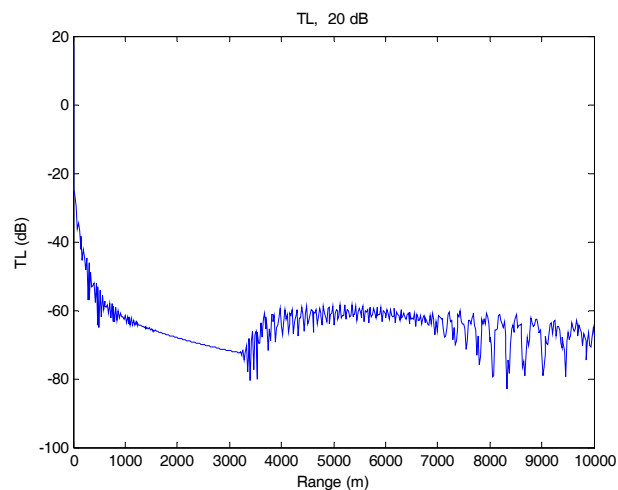


شکل ۶: اتلاف انتقال برای منبعی در عمق ۵ متری با فرکانس ۵۰ Hz در عمق ۳۰ متری در ایستگاه شماره ۲ دریای خزر

در شکل (۷)، الگوی انتشار موج حاصل از مدل، در ایستگاه شماره ۳ دریای خزر با طول جغرافیایی $53/853^{\circ}\text{E}$ و عرض جغرافیایی $38/170^{\circ}\text{N}$ تا برد ۱۰ کیلومتر نمایش داده شده است. در این حالت، منبع در عمق ۲۰ متری از سطح دریا قرار داشته و فرکانس صوت آن ۵۰ Hz است. شکل (۸) نیز اتلاف انتقال این منبع را در عمق ۳۰ متری نمایش می‌دهد.

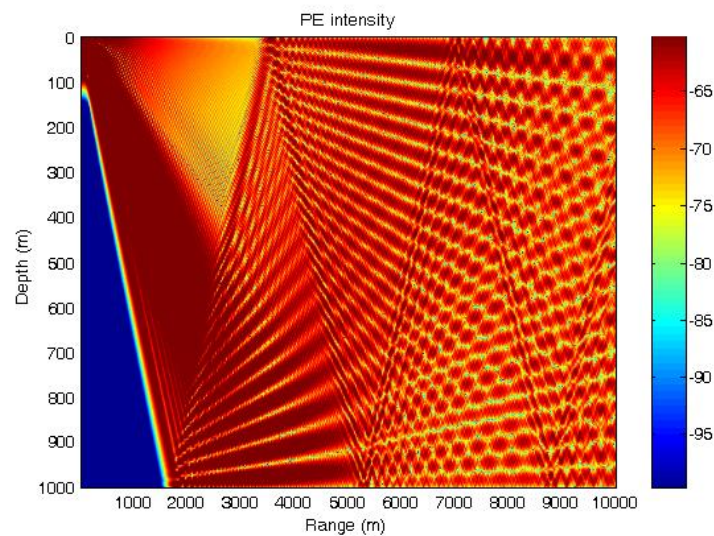


شکل ۷: انتشار موج از منبعی در عمق ۵ متری با فرکانس ۵۰ Hz در ایستگاه شماره ۳ دریای خزر

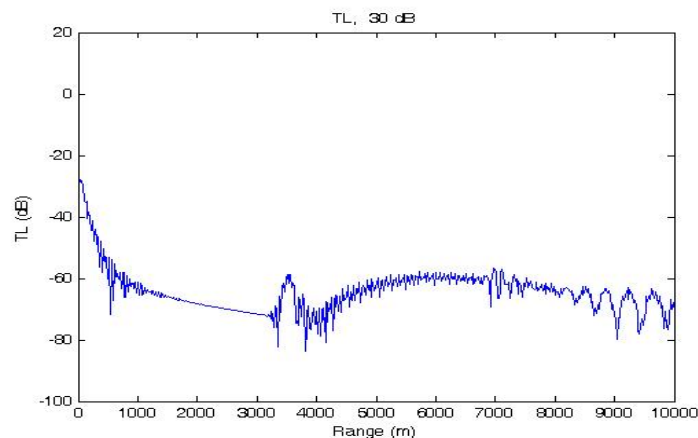


شکل ۸: اتلاف انتقال برای منبعی در عمق ۲۰ متری با فرکانس ۵۰ Hz در عمق ۳۰ متری در ایستگاه شماره ۳ دریای خزر

در شکل (۹)، الگوی انتشار موج حاصل از مدل، در ایستگاه شماره ۴ دریای خزر با طول جغرافیایی $50/752^{\circ}E$ و عرض جغرافیایی $38/968^{\circ}N$ تا برد ۱۰ کیلومتر نشان داده شده است. در این حالت، منبع در عمق ۵ متری از سطح دریا قرار داشته و فرکانس آن ۵۰ Hz است. شکل (۱۰) نیز، اتلاف انتقال این منبع را در عمق ۳۰ متری نمایش می‌دهد.



شکل ۹: الگوی انتشار موج برای منبعی در عمق ۵ متری با فرکانس ۵۰ Hz در ایستگاه شماره ۴ دریای خزر



شکل ۱۰: اتلاف انتقال برای منبعی در عمق ۵ متری با فرکانس ۵۰ Hz در عمق ۳۰ متری در ایستگاه شماره ۴ دریای خزر

نتیجه گیری

با توجه به منحنی های انتشار صوت در ایستگاه شماره ۱ دریای خزر، مشاهده می گردد که تأثیر انعکاسهای مربوط به سطح و بستر از برد ۴۵۰۰ متری آغاز می شود و با افزایش فرکانس منبع صوتی، اتلاف انتقال افزایش می یابد که این موضوع با تئوری، مطابقت دارد. نتیجه حاصل از شبیه سازی در این ایستگاه، با مقایسه با نتایج Jensen و دیگران^(۲)، صحت آن را اثبات می نماید. با مقایسه این نتیجه و نمودار ایده آل اتلاف در سیال همگن، اختلاف ناچیزی مشاهده می شود که ناشی از ناهمگنی آب دریای خزر می باشد.

اتلاف انتقال در ایستگاه شماره ۲ دریای خزر، هنگامی که منبع در عمق ۵ متری از سطح دریا قرار دارد و فرکانس صوت آن ۵۰ هرتز است، در برد ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر حداکثر (حدود ۹۰ دسی بل) می باشد و در برد ۱۰ کیلومتر، اتلاف انتقال به ۶۰ دسی بل می رسد.

در ایستگاه شماره ۳ دریای خزر، که منبع در عمق ۲۰ متری از سطح دریا با فرکانس ۵۰ هرتز قرار دارد، اتلاف انتقال در برد ۳۵۰۰ تا ۳۸۰۰ متر حداکثر (حدود ۸۰ دسی بل) و در برد ۱۰ کیلومتر به حدود ۶۰ دسی بل می رسد.

در انجام شبیه سازی انتشار، اتلاف انتقال کروی محیط با حداکثر عمق ۱۰۰ متر؛ عمق و فرکانس منبع به ترتیب ۵ متر و ۵۰ هرتز؛ سرعت صوت در ستون آب ۱۵۰۰ متر بر ثانیه؛ و سرعت صوت در بستر ۱۷۰۰ متر بر ثانیه؛ چگالی آب ۱/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و ضریب تضعیف بستر ۱ دسی بل بر کیلومتر در نظر گرفته شده است^(۲). خطای اتلاف انتقال در حالت های مختلف متفاوت است لیکن بطور متوسط در فاصله اندکی از منبع صوتی به گونه ای که اثرات اتلاف بستر قابل صرف نظر باشد می توان این مقدار خطای اتلاف انتقال را با استفاده از مقادیر بدست آمده از طریق مدل و مقادیر تئوری، حدود ۱۸/۴ درصد تخمین زد. مقادیر اتلاف انتقال در شکل های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ در حالت های مختلف نشان داده شده اند.

در نرم افزار طراحی شده، بدلیل فقدان نقشه کاملی از جنس بستر دریای خزر، از اثر بستر دریا در شبیه سازی صرف نظر شده است. لذا مقدار خطای محاسبه شده در مقایسه با یک مدل ایده آل ریاضی قابل قبول می باشد. از این رو با وارد نمودن اثرات تضعیف بستر به معادلات انتشار امواج صوتی، می توان به مدل انتشار امواج صوتی دقیقتری دست یافت.^(۷) به دلیل اهمیت نوفه های محیطی در فرآیند انتشار، تغییر توان صوتی منبع، اثر بسیار زیادی در انتشار دارد و در توان های بالاتر از ۲۰۰ دسی بل، تاثیر نوفه حذف شده و پدیده طنین جایگزین آن می گردد.

References:

1. Buckingham, M.J., *J. Acoust. Soc. Am.*, **3**, 223 (1992).
2. Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B. and Schmidt, H., *Computational Ocean Acoustics*, Springer Verlag, New York (1994).
3. Etter, P.C., *Underwater acoustic modeling and simulation*, Spon press, London (2003).
4. Collins, M.D. and Chin-Bing, S.A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **87**, 1104 (1990).
5. Oceanographic cruise, *Caspian sea area*, Caspian sea Report (1996).
6. Medwin, H., and Clay, C.S., *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, San Diego (1998).
7. Beebe, J.H., McDaniel, S.T., and Rubano, L.A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, 1417 (1982).