



Marine Noise Pollution: A Comprehensive Review of Sources, Impacts, and Mitigation Strategies

Sina Najari¹, Tahere Taghizade Firozjaee^{2*} 

¹ Ph.D. Student, Shahrood University of Technology, Faculty of Civil Engineering, sinanajari@shahroodut.ac.ir

² Assistant Professor, Shahrood University of Technology, Faculty of Civil Engineering, t.taghizade@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 12 Apr 2025

Last modification: 18 Sep 2025

Accepted: 20 Sep 2025

Available online: 20 Sep 2025

Article type:

Review Article

Keywords:

Marine Noise Pollution

Marine Ecosystems

Anthropogenic Sound Sources

Physiological and Behavioral

Impacts

Mitigation Strategies

ABSTRACT

This comprehensive review examines anthropogenic noise pollution in marine environments and its impacts on aquatic ecosystems. With an 85% increase in industrial activities in oceans over the past two decades, noise pollution has emerged as a serious threat to marine biomes. Studies demonstrate that anthropogenic noise, particularly from shipping and drilling operations, can cause auditory impairment, behavioral changes, hearing organ damage, and population declines in aquatic species. Adult fish and marine mammals are most severely affected. However, methodological variations and limited research on other species and life stages constrain our full understanding of this issue. To address these challenges, this paper analyzes both biological and non-biological sound sources, the ecological significance of sound for marine life, and species-specific impacts of anthropogenic noise. We systematically evaluate existing regulations and management regimes governing noise-generating marine activities, while assessing optimal mitigation strategies and best practices. Given the accelerating expansion of human activities in ocean ecosystems, addressing noise pollution through effective mitigation measures has become critically important for marine conservation.

ISSN: 2645-
0122



DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]



مقاله مروری

آلودگی صوتی در دریاها: نگاهی جامع به منابع، پیامدها و راهکارهای کاهش

سینا نجاری^۱، طاهره تقی زاده فیروزجایی^{۲*} 

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، sinanajari@shahroodut.ac.ir

^۲ استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، t.taghizade@shahroodut.ac.ir

چکیده

این مطالعه مروری به بررسی جامع آلودگی صوتی انسان‌زاد در محیط‌های دریایی و پیامدهای آن بر اکوسیستم‌های آبی می‌پردازد. با افزایش ۸۵ درصدی فعالیت‌های صنعتی در دریاها طی دو دهه اخیر، آلودگی صوتی به یک تهدید جدی برای زیست‌بوم‌های دریایی تبدیل شده است. مطالعات نشان داده است که صداهای انسان‌زاد، به ویژه از کشتیرانی و حفاری، می‌تواند منجر به اختلالات شنوایی، تغییر رفتار، آسیب به اندام‌های شنوایی، و کاهش جمعیت آبزیان شود. ماهی‌های بالغ و پستانداران دریایی بیشترین تأثیر را می‌پذیرند. با این حال، تنوع روش‌های تحقیق و کمبود مطالعات در مورد گونه‌های دیگر و مراحل لاروی و نوجوانی، درک کامل این مسئله را محدود می‌کند. برای رفع این چالش، این مقاله به بررسی منابع زیستی و غیرزیستی صدا، اهمیت صدا برای موجودات دریایی، و اثرات صداهای انسان‌زاد بر گونه‌های مختلف می‌پردازد. همچنین، به تشریح و تجزیه و تحلیل قوانین موجود و رژیم‌های مدیریتی که بر فعالیت‌های دریایی که نویز تولید می‌کنند، می‌پردازد. بهترین شیوه‌ها و اقدامات کاهش‌ی مشخص نیز مورد توجه و ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش روزافزون فعالیت‌های انسانی در اقیانوس‌ها، توجه به آلودگی صوتی و اتخاذ اقدامات لازم برای کاهش آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

نوع مقاله:

مقاله مروری

کلمات کلیدی:

آلودگی صوتی دریایی

زیست‌بوم‌های دریایی

منابع صوتی انسانی

تأثیرات فیزیولوژیک و رفتاری

راهبرد های کاهش

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱ - مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه شهرها و گسترش صنایع مرتبط با دریا باعث افزایش فعالیت‌های انسانی در محیط‌های آبی و دریایی شده است [۱-۳]. یکی از نتایج این توسعه، بروز آلودگی صوتی دریایی است که به دلیل انتشار صدهای غیرطبیعی در زیستگاه‌های آبی، تعادل اکوسیستم‌های دریاها را مختل کرده است [۴]. این آلودگی ناشی از فعالیت‌هایی مانند تردد کشتی‌ها، کاربرد سونارهای نظامی و تجاری، عملیات حفاری نفت و گاز، مطالعات لرزه نگاری، پروژه‌های عمرانی در دریا، و استفاده از ماشین‌آلاتی مانند چکش‌های شمع‌کوب و دیگر دستگاه‌های صنعتی است. امواج صوتی تولید شده توسط این منابع می‌توانند از نظر شدت، گستردگی و تأثیر بر محیط دریایی بسیار متفاوت باشند و در بسیاری از موارد، پیامد‌های زیانباری برای جانداران آبی به همراه دارند [۵-۹].

محیط زیرآب، برخلاف جو زمین، شرایط فیزیکی منحصر به فردی حاکم است که انتشار صوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت انتقال صوت در آب تقریباً ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است که این مقدار حدود پنج برابر بیشتر از سرعت صوت در هوا می‌باشد. این خاصیت موجب می‌شود امواج صوتی در آب بتوانند مسافت‌های بسیار دورتری را با حداقل کاهش انرژی طی نمایند [۱۰]. علاوه بر این، متغیرهایی نظیر درجه حرارت، میزان شوری، فشار آب و چگالی آن نیز بر نحوه انتشار صوت تأثیر می‌گذارند. به همین دلیل، با توجه به پیچیدگی‌های رفتار امواج صوتی در محیط آبی، ارزیابی دقیق تأثیرات آلودگی صوتی بر موجودات دریایی با دشواری‌های زیادی همراه است [۱۱].

موجودات دریایی، به‌ویژه پستاندارانی مانند دلفین‌ها و نهنگ‌ها، برخی انواع ماهی‌ها و حتی بی‌مهرگان، برای انجام عملکردهای ضروری زندگی خود به امواج صوتی متکی هستند. فعالیت‌هایی مانند جهت‌یابی، ارتباطات اجتماعی، شکار، شناسایی خطرات و جفت‌گیری همگی به قابلیت شنیداری و تولید صدا در محیط آبی وابسته هستند. افزایش سر و صدای ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌تواند این مکانیسم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار دهد و عوارضی مانند تشدید تنش، رفتارهای فرارناگهانی، انحراف از مسیرهای مهاجرت، کاهش موفقیت تولید مثلی و در موارد شدید، تلفات ناشی از قرارگیری در معرض اصوات بلند را ایجاد کند [۱۲]. پژوهش‌های مختلف حاکی از آن است که در پی افزایش آلودگی صوتی، برخی آبزیان مناطق زندگی خود را رها کرده و به نواحی آرام‌تر کوچ می‌کنند. چنین جابه‌جایی‌هایی می‌تواند تعادل زیستی

دریاها را برهم زده و چرخه‌های طبیعی تغذیه را با مشکل مواجه سازد [۴، ۱۵-۱۳].

با توجه به گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی و نظامی در دریاها و پیامد‌های آن بر زیستگاه‌های آبی، ضرورت بررسی و پایش اثرات این آلودگی پیش از پیش احساس می‌شود. در این پژوهش، به بررسی منابع صوتی زیستی و غیرزیستی در دریا، اهمیت صدا برای جانداران دریایی، اثرات مخرب آلودگی صوتی بر گونه‌های مختلف آبی و همچنین راهکارهای کاهش این معضل از طریق قوانین و فناوری‌های جدید پرداخته می‌شود. هدف از این مطالعه، ارائه درکی جامع از ابعاد مختلف آلودگی صوتی زیر دریا و شناسایی خلأهای تحقیقاتی موجود است تا بتوان راهکارهای مؤثرتری برای مدیریت و کاهش اثرات منفی این نوع آلودگی در اکوسیستم‌های دریایی ارائه داد. در این مطالعه، داده‌ها از طریق جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده معتبر با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با آلودگی صوتی دریایی گردآوری شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل تمرکز بر مطالعات تجربی با گروه کنترل، ارائه شواهد کمی از تأثیرات فیزیولوژیک صدا، و انتشار در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ بود. از میان ۳۲۰ مطالعه اولیه، نهایتاً ۹۶ پژوهش که واجد تمام این شرایط بودند و شامل اندازه‌گیری‌های فیزیولوژیک تحت شرایط کنترل شده صوتی می‌شدند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

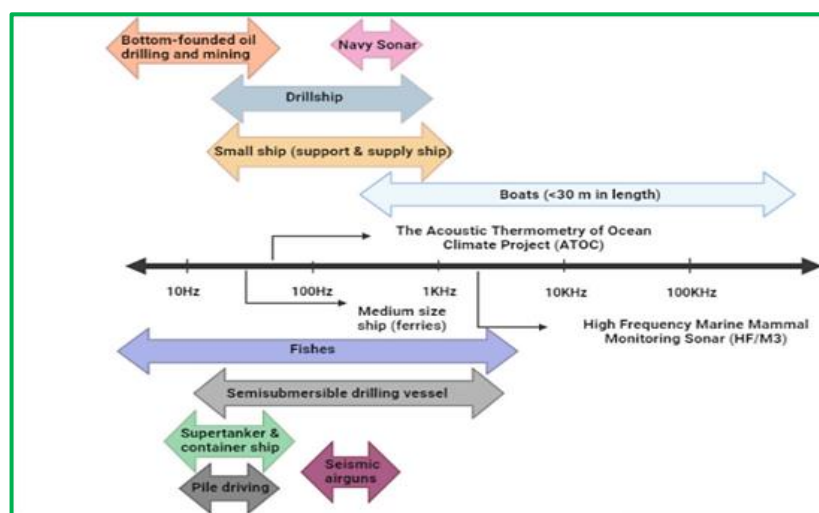
۲ - انواع آلودگی صوتی و محدوده فرکانسی آن‌ها

اگرچه بخش عمده‌ای از پژوهش‌های حوزه آلودگی صوتی زیرآب به منابع انسانی اختصاص یافته است، بنابراین منابع طبیعی نیز نقش بسزایی در تولید صدهای زیرآبی ایفا می‌کنند. منابع فیزیکی تولید صدا شامل پدیده‌های جوی نظیر وزش باد، امواج سطحی، نوسانات دریا، بارش‌های جوی، صاعقه و فعالیت‌های یخ‌های قطبی، همراه با منابع زمین‌ساختی مانند زلزله می‌شود. در مقابل، اصوات بیولوژیک عمدتاً ناشی از فعالیت‌های پستانداران دریایی، ماهیان و بی‌مهرگان می‌باشد [۱۶]. این منابع صوتی طبیعی به صورت مستمر در محیط‌های آبی وجود داشته‌اند، بنابراین گونه‌های دریایی از لحاظ تکاملی با این شرایط صوتی سازگار شده‌اند. در میان عوامل فیزیکی، اثر ترکیبی باد و امواج سطحی مهم‌ترین مکانیسم تولید صدهای طبیعی در اقیانوس‌ها محسوب می‌شود. یافته‌های پژوهشی حاکی از آن است که تغییرات سطح نویز ناشی از شرایط دریا در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز از الگوی یکسانی تبعیت می‌کند [۱۶]. در شرایطی که صدهای انسانی و

زیستی حضور ندارند، نویز پس‌زمینه در دریا عمدتاً تحت تأثیر باد بوده و در بازه فرکانسی گسترده‌ای از کمتر از ۱ هرتز تا حداقل ۱۰۰ کیلوهرتز مشاهده می‌شود. در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۰ هرتز، برهم‌کنش میان امواج گرانشی سطحی، نقش اصلی را در تولید صدا ایفا می‌کند [۱۷]. در بازه ۱۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز، اگرچه تأثیر حباب‌های نوسانی در ستون آب محدود است، اما همین حباب‌ها به عنوان یکی از منابع اصلی نویز شناخته می‌شوند. همچنین، در گستره فرکانسی ۱۰۰ هرتز تا بیش از ۲۰ کیلوهرتز، بارش باران می‌تواند موجب افزایش قابل توجهی در سطح نویز محیطی تا حدود ۳۵ دسی‌بل شود [۱۸]. در مقابل، پدیده‌هایی نظیر شکستن یخ نیز قادر هستند سطح نویز را تا ۳۰ دسی‌بل افزایش داده و پالس‌هایی با پهنای بلندی تا حدود ۱ کیلوهرتز و با مدت‌زمان بیش از یک ثانیه تولید کنند. از سوی دیگر، رویدادهایی مانند زمین‌لرزه و رعد و برق که به عنوان منابع طبیعی گذرا شناخته می‌شوند، بیشترین انرژی صوتی خود را در بازه ۵۰ تا ۲۵۰ هرتز ساطع کرده و می‌توانند شدت صوت را تا ۱۵ دسی‌بل فراتر از سطح معمول افزایش دهند [۱۹]. در شکل زیر محدوده‌های فرکانسی صداها تولید شده توسط منابع طبیعی و انسانی به تصویر کشیده شده است [۱۱].

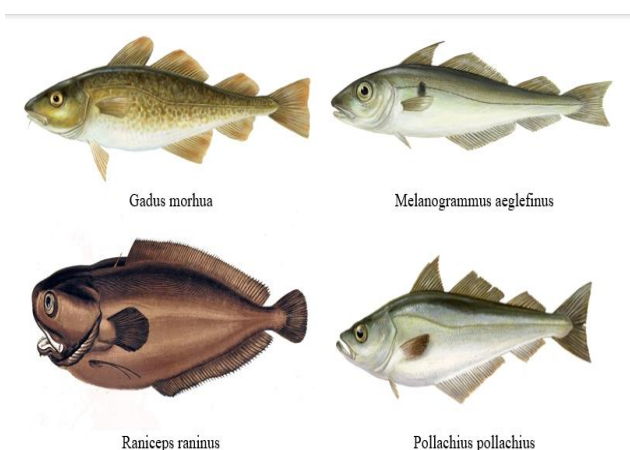
بررسی‌های سیستماتیک نشان می‌دهد که محدوده فرکانسی منابع آلودگی صوتی دریایی از فرکانس‌های بسیار پایین (کمتر از ۱۰ هرتز) تا فرکانس‌های بسیار بالا (بیش از ۲۰۰ کیلوهرتز) گسترده است [۱]. منابع کم فرکانس مانند ترافیک کشتی‌ها (۱۰-۵۰۰ هرتز) و عملیات لرزه‌نگاری (۵-۳۰۰ هرتز) به دلیل طول موج بلندتر، توانایی انتشار در مسافت‌های هزاران کیلومتری را دارند [۲۰]. در مقابل، منابع پرفرکانس مانند سونارهای نظامی

(۲۰۰-۳۰ کیلوهرتز) و دستگاه‌های ناوبری (۲۰۰-۳۰ کیلوهرتز) اگرچه برد کوتاه‌تری دارند، اما تأثیر مستقیم‌تری بر سیستم شنوایی آبزیان می‌گذارند [۲۱]. مطالعات نشان داده‌اند که حساسیت شنوایی گونه‌های مختلف به این محدوده‌های فرکانسی به شدت متفاوت است. برای مثال، نهنگ‌های باله‌ای بیشترین حساسیت را به فرکانس‌های ۱۰-۳۰ هرتز نشان می‌دهند [۲۲]. در حالی که دلفین‌های پوزه بطری به محدوده ۲۰-۱۵۰ کیلوهرتز پاسخ می‌دهند [۲۳]. این تفاوت‌های فرکانسی باید در ارزیابی‌های زیست محیطی و تدوین استانداردهای آلودگی صوتی به دقت مورد توجه قرار گیرد [۲۴]. در نتیجه یکی از جنبه‌های مهم در بررسی آلودگی صوتی در محیط‌های آبی، تحلیل محدوده فرکانسی نویزهای ایجادشده توسط منابع مختلف است. مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت‌های کشتیرانی و ترافیک دریایی عمدتاً در محدوده فرکانس‌های پایین تولید صدا می‌کنند، که این بازه بیشترین هم‌پوشانی را با محدوده شنوایی گونه‌های پستانداران دریایی دارد. در مقابل، فعالیت‌های صنعتی و عملیات ساخت و ساز دریایی مانند کوبش شمع و حفاری می‌توانند نویزهایی با فرکانس‌های میانی و بالا ایجاد کنند که اثر گذاری متفاوتی بر ماهیان و بی‌مهرگان دارد. همچنین، سامانه‌های سونار نظامی و ناوبری اغلب در بازه‌های فرکانسی بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز فعالیت می‌کنند که برای برخی گونه‌ها مانند دلفین‌ها و نهنگ‌های دندان‌دار اهمیت زیستی ویژه‌ای دارد. بنابراین، بررسی محدوده‌های فرکانسی آلودگی صوتی می‌تواند در درک بهتر شدت اثرات بر گونه‌های مختلف و طراحی راهبردهای مدیریت زیست محیطی نقش کلیدی ایفا کند.



شکل ۱ - فرکانس‌های صوتی ناشی فعالیت‌های انسانی [۱۱]

تولید مثل آبریان ایفا می کنند [۴]. صداهای زیستی توسط گروه های مختلفی از موجودات دریایی از جمله ماهیان، بی مهرگان و پستانداران دریایی تولید می شود و برای فعالیت هایی نظیر برقراری ارتباط، مسیریابی، یافتن جفت، شکار و پژواک یابی اهمیت دارد [۳۰، ۳۱]. این جانداران بسته به گونه خود، مکانیسم های متفاوتی برای تولید صدا به کار می برند [۳۲]. برای نمونه، برخی ماهیان مانند گونه های متعلق به خانواده کاد قادر هستند با استفاده از انقباض عضلات اطراف مثانه، ارتعاش ایجاد کرده و صوت تولید کنند [۳۳] که تصویر آن ها در شکل ۲ آمده است. برخی جانوران آبی برای تولید صدا از مالش دادن بخش های سخت بدن خود بهره می برند. به عنوان نمونه، گونه هایی از گربه ماهی ها با استفاده از کمر بند سینه ای خود صدا ایجاد می کنند. در برخی سیکلیدها نیز دندان های حلقی نقش تولید کننده صوت را بر عهده دارند. همچنین، میگوی تفنگچی با ضربه زدن چنگال خود، صداهایی با فرکانس متوسط در محدوده ۲ تا ۲۴ کیلوهرتز ایجاد می نماید [۳۱، ۳۴-۳۶]. در کنار صداهای زیستی، صداهای غیرزیستی نیز در محیط های دریایی نقش مهمی دارند و اطلاعات محیطی مهمی را به موجودات دریایی منتقل می کنند. این صداها به طور کلی در دو دسته قرار می گیرند: صداهای طبیعی پس زمینه و صداهای ناشی از فعالیت های انسانی. عواملی مانند برخورد موج ها با سواحل، عبور جریان آب از روی صخره ها، افتادن قطرات باران بر سطح دریا، جزر و مد، آشفستگی های سطحی اقیانوس، و نیز زمین لرزه ها و آتشفشان های زیر آبی از جمله منابع رایج صداهای طبیعی پس زمینه در دریا به شمار می روند [۳۷].



شکل ۲- انواع ماهی کاد که می توانند با لرزاندن مثانه صدا تولید کنند.

در سال های اخیر، تنوع و فراوانی صدا های ناشی از فعالیت های انسانی در اقیانوس های آزاد و در نواحی ساحلی پرتردد به طور

درک تأثیرات صوت بر اکوسیستم های دریایی مستلزم شناخت ویژگی های فیزیکی امواج صوتی از جمله فرکانس، طول موج و دامنه است. در این میان، رفتار انتشار صوت در محیط های گوناگون از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. در محیط دریایی، پارامترهای فیزیکی آب از قبیل دما، شوری و فشار هیدرواستاتیک به طور چشمگیری بر سرعت انتشار صوت تأثیر می گذارند. جالب توجه آنکه تضعیف انرژی صوتی در محدوده فرکانس های پایین عمدتاً تحت تأثیر pH محیط آبی قرار دارد. یافته های پژوهشی مؤید آن است که تغییرات سرعت صوت در اثر گرادیان های عمودی و افقی دما، شوری و فشار منجر به پدیده شکست امواج صوتی می گردد. پدیده تضعیف صوت با افزایش فاصله از منبع (افت انتقال صوت) از دیگر ویژگی های مهم انتشار صوت در محیط های آبی محسوب می شود [۲۵]. این تضعیف ناشی از مکانیزم های مختلفی شامل جذب توسط محیط آبی، بستر دریا و پراکندگی توسط ذرات معلق و موجودات زنده می باشد. میزان این تلفات انرژی به عواملی همچون فاصله از منبع، موقعیت منبع، تراکم ذرات معلق، مشخصات فرکانسی صوت و همچنین پدیده بازتاب امواج وابسته است [۲۶]. انتقال صوت در آب دریا تحت تأثیر ویژگی های فیزیکی متغیر محیط، با تغییراتی همراه است و شکست امواج صوتی نیز مسیر انتشار آن را تحت تأثیر قرار می دهد [۲۷]. در این زمینه محققین یک نمونه تغییر در مسیر صوت را در حین در این راستا، پژوهشگران به بررسی تغییر مسیر امواج صوتی هنگام عبور از لایه ترموکلاین پرداخته اند. زمانی که صوت در این لایه به سمت اعماق حرکت می کند، به دلیل افزایش تدریجی فشار، مسیر انتشار آن پس از عبور از ترموکلاین به سمت بالا منحرف می شود [۲۷، ۲۸]. این پدیده منجر به تشکیل ناحیه ای در اعماق دریا می شود که از آن با عنوان «کانال آکوستیکی عمیق» یاد می شود. این کانال، ناحیه ای در اقیانوس است که به دلیل شرایط ویژه دما و فشار، امکان انتقال امواج صوتی را در فواصل بسیار طولانی با کمترین میزان افت انرژی و اعوجاج فراهم می کند. همچنین، یافته ها نشان می دهد که امواج صوتی با فرکانس بالا به سرعت در آب مستهلک می شوند و تنها قادر به طی مسافت های نسبتاً کوتاه (در حد چند کیلومتر) هستند، در حالی که فرکانس های پایین می توانند در مقیاس های وسیع تر، حتی بیش از هزار کیلومتر، انتشار یابند [۲۹]. در محیط دریایی، امواج صوتی ناشی از ارتعاشات به صورت موج های فشاری و با سرعتی در حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در آب منتشر می شوند. بر اساس مطالعات انجام شده، صدای حاصل از عملیات شمع کوبی قابلیت شناسایی تا فاصله ای در حدود ۷۰ کیلومتر در جهت افقی را دارد [۱۰].

زیستگاه های زیرسطحی دریا ترکیبی از صداهای طبیعی و غیرطبیعی هستند که نقش مهمی در فرآیندهای حیاتی مانند بقا و

[۴۰]	~195 dB re 1 μ Pa	~75 Hz	پروژه ترمومتری صوتی آب و هوای اقیانوس
[۴۱]	180–205 dB re 1 μ Pa	6.8–70 Hz	نفکشی و کشتی کانتینری
[۴۲]	150–170 dB re 1 μ Pa	~50 Hz	کشتی با اندازه متوسط (کشتی‌های مسافری)
[۴۲]	~175 dB re 1 μ Pa	<300 Hz	قایق
[۴۲]	170–180 dB re 1 μ Pa	20–1000 Hz	کشتی کوچک

۳- حساسیت شنوایی در موجودات دریایی

موجودات زنده از نظر حساسیت و دامنه شنوایی با یکدیگر تفاوت دارند. به طور کلی، ماهی‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: گروهی که دامنه فرکانس شنوایی وسیعی دارند و آستانه شنوایی آن‌ها پایین است، و گروهی که دامنه فرکانس شنوایی محدودی دارند و آستانه شنوایی آن‌ها بالاتر است. برای مثال، ماهی وزغ بیش‌ترین حساسیت شنوایی خود را در فرکانس‌های صوتی بین ۵۰ هرتز و ۲۰۰ هرتز نشان می‌دهد [۴۶، ۴۷]. در مقابل، ماهی مینو حساس‌ترین محدوده شنوایی خود را بین ۰.۸ کیلوهرتز و ۲ کیلوهرتز دارد. در میان پستانداران دریایی نیز، نهنگ باله‌ای دامنه شنوایی وسیعی از ۰.۰۱ کیلوهرتز تا ۱۰ کیلوهرتز دارد، در حالی که دامنه شنوایی شیر دریایی نسبتاً محدود است و بین ۱ کیلوهرتز تا ۱۰ کیلوهرتز قرار دارد [۴]. محدوده، شدت و فراوانی آلودگی صوتی ناشی از انسان ممکن است به‌طور قابل توجهی بیشتر از محرک‌های صوتی طبیعی باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که سر و صدای انسان‌زاد می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر بسیاری از موجودات دریایی تأثیر بگذارد. این اثرات حتی در مورد لاک‌پشت‌ها و خرچنگ‌ها نیز به اثبات رسیده است [۴۸–۵۰]. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که حساسیت شنوایی موجودات دریایی نه تنها به محدوده فرکانسی، بلکه به عوامل متعدد دیگری از جمله عمق زیستگاه، سن موجود و وضعیت فیزیولوژیک نیز وابسته است [۵۱]. مطالعات الکتروفیزیولوژیک نشان داده‌اند که پستانداران دریایی مانند نهنگ‌های دندان‌دار دارای سیستم شنوایی هستند که می‌تواند تا ۲۰۰ کیلوهرتز را تشخیص دهد [۵۲]. در مقابل، ماهیان استخوانی معمولاً به فرکانس‌های زیر ۳ کیلوهرتز حساسیت دارند، اگرچه برخی گونه‌ها مانند خانواده کپور ماهیان توانایی تشخیص فرکانس‌های تا ۷ کیلوهرتز را نیز دارا هستند [۵۳] با توجه به اینکه نرم‌تنان و سخت‌پوستان اگرچه فاقد گوش داخلی هستند، اما از طریق گیرنده‌های مکانیکی ویژه‌ای قادر به تشخیص ارتعاشات آبی در محدوده ۵۰–۳۰۰۰ هرتز می‌باشند [۵۴]. این تفاوت‌های ساختاری و عملکردی باید در ارزیابی اثرات آلودگی صوتی به دقت مورد توجه قرار گیرد، چرا که یک منبع صوتی خاص ممکن است

چشمگیری افزایش یافته است [۵، ۷، ۳۸، ۳۹]. این اصوات، که حاصل فرآیند‌های مختلف انسانی هستند، از نظر شدت و دامنه فرکانسی تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند (جدول ۱) [۴۰–۴۲]. با توجه به ویژگی‌های صوتی مانند فرکانس و شدت، می‌توان صداهای انسان‌زاد را در دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: صداهای ضربه‌ای با شدت بالا و صداهای یکنواخت با فرکانس پایین. منابعی همچون عملیات شمع‌کوبی، انفجارهای زیرآبی، اکتشافات ژئوفیزیکی با روش لرزه‌ای، و استفاده از سونار فعال از جمله عواملی هستند که موجب تولید نویزهای ضربه‌ای با شدت بالا در محیط زیرآب می‌شوند [۴۳]. در حال حاضر، عملیات شمع‌کوبی که یک فعالیت رایج در ساخت و ساز است، بیشتر در مناطق نزدیک به سواحل، جایی که پروژه‌هایی مانند ساخت پل‌ها، بنادر، مزارع بادی و سایر سازه‌ها انجام می‌شود، انجام می‌گیرد. دستگاه‌های اکتشاف لرزه‌ای، که عمدتاً شامل تفنگ‌های هوا هستند، در سراسر جهان برای انجام بررسی‌های زمین‌شناسی زیرآبی و مطالعات ژئوفیزیکی مانند اکتشاف منابع نفت و گاز و نقشه برداری از بستر دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۴]. همچنین، سیستم‌های سونار که صداهایی با شدت‌های مختلف تولید می‌کنند، به‌طور گسترده توسط نیروهای دریایی، کشتی‌های تجاری، صنعت ماهیگیری و سازمان‌های تحقیقاتی دریایی به کار گرفته می‌شوند [۴۴]. سر و صدای مداوم با فرکانس پایین می‌تواند به وسیله کشتی‌ها و شناورهای مختلف تولید شود [۴۳]. اگرچه تعداد کشتی‌های ماهیگیری از دهه ۱۹۶۰ تغییرات زیادی نداشته است، اما هنوز حدود ۱.۲ میلیون کشتی در حال فعالیت هستند [۴]. علاوه بر این، تعداد قایق‌های تفریحی در سواحل به سرعت در حال افزایش است. یکی دیگر از منابع فزاینده صداها، ثابت با فرکانس پایین در دریا، رشد تعداد کشتی‌های باری اقیانوس پیما است که محموله‌های بزرگ را به عنوان بخش حیاتی از تجارت جهانی حمل می‌کنند. تعداد این کشتی‌ها در دهه اول قرن ۲۱ به‌طور مستمر بین ۸ تا ۱۴ درصد افزایش داشته است [۴۵].

جدول ۱ - نمونه‌هایی از سر و صدای انسان‌زاد گزارش شده در دریا با فرکانس‌ها و سطوح شدت مختلف [۴۰].

انواع صدای انسان‌زاد	سطح فرکانس	شدت فرکانس	دفرنس
حفاری و استخراج نفت از بستر دریا	4–38 Hz	119–127 dB re 1 μ Pa	[۴۲]
شمع‌کوبی	30–40 Hz	131–135 dB re 1 μ Pa	[۴۲]
کشتی حفاری	20–1000 Hz	174–185 dB re 1 μ Pa	[۴۲]
شناور حفاری نیمه شناور	10–4000 Hz	~154 dB re 1 μ Pa	[۴۲]
تفنگ‌های هوای لرزه‌ای	100–250 Hz	240–250 dB re 1 μ Pa	[۴۲]

برای یک گونه کاملاً مخرب باشد، در حالی که گونه دیگر را تحت تأثیر قرار ندهد [۵۵]. بنابراین، یکی از عوامل تعیین کننده در ارزیابی اثرات آلودگی صوتی، حساسیت شنوایی گونه های مختلف دریایی است. گونه های متفاوت، آستانه های شنوایی خاصی در بازه های فرکانسی متنوع دارند که این تفاوت در حساسیت شنوایی موجب می شود که یک منبع صوتی مشخص، اثرات ناهمگونی بر گونه های مختلف برجای گذارد و همین امر ضرورت توجه ویژه به تطابق طیف فرکانسی نویز با محدوده های شنوایی موجودات دریایی را برجسته می سازد.

۴- تأثیر آلودگی صوتی بر موجودات دریایی

آلودگی صوتی می تواند تأثیرات منفی مختلفی بر پستانداران دریایی داشته باشد، از جمله تغییرات در رفتار فیزیکی، اختلال در ارتباطات، تغییرات موقت یا دائمی در آستانه شنوایی و ایجاد استرس. پستانداران دریایی برای انجام وظایف حیاتی خود مانند جستجوی طعمه، اجتناب از شکارچیان، یافتن فرزندان و جفت یابی به صداهای زیرآبی وابسته هستند [۵۶]. بنابراین، عدم اتخاذ تدابیر لازم برای محافظت از آن ها در برابر آلودگی صوتی زیر آب می تواند به اختلال در زندگی دریایی منجر شود. حساسیت موجودات دریایی به آلودگی صوتی اقیانوس ها متفاوت است [۴۳]. در حالی که گونه هایی مانند نهنگ ها و دلفین ها ممکن است مقاومت بیشتری از خود نشان دهند، گونه هایی مانند نرم تن ها، میگو ها و ماهی ها حساسیت بیشتری دارند [۵۷، ۵۸].

این موجودات برای ارتباط برقرار کردن، مسیریابی و پیدا کردن غذا به صدا وابسته هستند. صدای بلند و مداوم تولید شده توسط زیردریایی ها می تواند این فعالیت های حیاتی را مختل کرده و باعث سرگردانی، استرس و حتی مرگ شود. پستانداران دریایی به دلیل آلودگی صوتی ناشی از زیردریایی ها ممکن است به سواحل پناه ببرند [۱۴]. علاوه بر پستانداران دریایی، آلودگی صوتی زیردریایی ها می تواند تأثیرات منفی بر ماهی ها و دیگر موجودات دریایی نیز بگذارد. این صداها می توانند رفتار و الگوهای مهاجرت آن ها را تغییر داده و پیدا کردن غذا یا فرار از شکارچیان را برایشان دشوار کنند. در نتیجه، تمام زنجیره غذایی این موجودات تحت تأثیر قرار گرفته و اثرات قابل توجهی بر سلامت اکوسیستم خواهند گذاشت [۵۹].

سر و صدای انسان را می تواند رفتار برخی از موجودات دریایی را تحت تأثیر قرار داده و باعث بروز تغییرات رفتاری نظیر واکنش های شگفت زده یا حواس پرتی شود. به عنوان مثال، برخی از محققین رفتار های ماهی مرکب و دو گونه ماهی کفزی، تروالی و صورتی را قبل، حین و پس از مواجهه با صدای ماهی ایرگان بررسی کرده اند [۶۰]. دستگاه ایرگان یک دستگاه فشار آب بالا است که با ایجاد فشار در آب، شوک های صوتی تولید می کند و به عنوان یک منبع

سونار برای شناسایی زیر دریایی ها و کشف منابع نفت و گاز استفاده می شود [۶۱]. دهند و ماهی مرکب نیز واکنش های هشدار قابل توجهی از خود نشان داد. هنگامی که این موجودات در معرض تمرینات سونار با فرکانس متوسط، سونار نظامی شبیه سازی شده، صدای نهنگ قاتل یا صداهای محدود باند قرار گرفتند، رفتار جستجوی غذا در نهنگ منقاری بلین ویل دچار اختلال شد [۶۱]. شوارتز و گریپر همچنین دریافتند که شاه ماهی اقیانوس آرام به انواع مختلف صدا واکنش های متفاوتی نشان می دهد. صدای کشتی های بزرگ که با سرعت ثابت نزدیک می شوند و کشتی های کوچک تر که با شتاب به سمت آن ها می آیند، موجب استرس در شاه ماهی می شود. این نشان می دهد که شاه ماهی نسبت به صدای فرکانس بالای سونار و اکو حساس تر از صدای فرکانس پایین تولید شده توسط کشتی ها است [۶۲].

گرچه بسیاری از پستانداران دریایی مکانیزم های تطبیقی برای مقابله با سر و صدا توسعه داده اند، مواجهه با صدا های شدید می تواند تغییراتی در ترشحات غدد درون ریز از جمله گلوکوکورتیکوئیدها و همچنین در ضربان قلب ایجاد کرده و در نهایت منجر به استرس فیزیولوژیکی شود. [۶۳]. برای مثال، در نهنگ های سفید، سطوح نوراپی نفرین، اپی نفرین و دوپامین پس از قرار گرفتن در معرض صدای با شدت بالا (۱۰۰ کیلو پاسکال) و انفجار لرزه ای (در محدوده تقریباً ۸ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال) به طور قابل توجهی افزایش می یابد [۶۴]. در دلفین ها، پس از قرار گرفتن در معرض صدای انفجار (۴۴-۲۰۷ کیلو پاسکال یا ۲۱۳-۲۲۶ دسی بل در مقابل فشار اوج ۱ میکرو پاسکال)، افزایش قابل توجهی در آلدوسترون و کاهش چشمگیر در تعداد مونوسیت ها مشاهده شد [۶۴]. تحقیقات نشان داده اند که تجمع نهنگ های منقاری با قرارگیری در معرض نویز ناشی از سونارهای نظامی مرتبط است. صدای سونار نظامی موجب تغییراتی در الگوی حرکت این گونه ها و تغییرات در متابولیسم آنها می شود [۶۵، ۶۶].

علاوه بر ایجاد پوشش شنوایی، آسیب های بافتی در سیستم های شنوایی که منجر به تغییرات رفتاری می شود و تغییر در پراکنش و فراوانی جمعیت ها، آلودگی صوتی می تواند مجموعه ای از واکنش های فیزیولوژیک را نیز در موجودات دریایی تحریک کند (جدول ۲). به عنوان مثال، کاسپر و همکاران تأثیر صدای ضربه ای ناشی از عملیات کوبیدن شمع را بر دو گروه مختلف از ماهی باس راهراه دورگه بررسی کردند. نتایج نشان داد که ماهی های بزرگ تر نسبت به ماهی های کوچک تر، هم از نظر تعداد آسیب دیده و هم از نظر شدت آسیب، بیشتر در معرض آسیب قرار داشتند [۶۷]. به طور کلی آلودگی صوتی می تواند موجب اختلالات متابولیک قابل توجهی در موجودات دریایی می شود، طبق تحقیقات انجام شده، قرار گیری در معرض صداهای با شدت بالا ۱۵۰ دسی بل منجر به

افزایش سطح کورتیزول و گلوکز خون در گونه های مختلف ماهیان می شود [۶۸]. این پاسخ استرسی در پستانداران دریایی با فعال شدن محور هیپوتالاموس هیپوفیز می گردد [۶۹]، که با متابولیسم پایه همراه است. متابولیسم پایه در حقیقت به این معنی است که بدن حتی در هنگام استراحت نیز کالری می سوزاند که در نهایت موجب افزایش مصرف انرژی پایه می شود. برای مثال در دلفین ها، مواجهه با سونارهای نظامی منجر به افزایش ضربان قلب و کاهش اکسیژن رسانی به بافت های محیطی می شود [۷۰]. همچنین در بی مهرگان مانند میگوی قهوه ای قرارگیری در معرض صدای کشتی ها موجب کاهش نرخ رشد و اختلال در متابولیسم شده است [۷۱]. این تغییرات متابولیک نه تنها بر سلامت فردی موجودات تأثیر می گذارد، بلکه می تواند با کاهش موفقیت تولید مثلی و اختلال در زنجیره غذایی، تعادل کل اکوسیستم های دریایی را برهم زند [۷۲، ۲۴].

جدول ۲ - نمونه های از مطالعات نشان دهنده تأثیرات فیزیولوژیک صدای انسان ساخت بر موجودات دریایی

گونه ها	نوع صدای انسان ساخت	تأثیرات	منابع
میگو قهوه ای	دستگاه تولید صدای آزمایشی	افزایش متابولیسم و کاهش رشد	[۴۷]
نهنگ سفید دلفین پوزه بطری	شلیک تفنگ هوای لرزه نگاری	افزایش متابولیسم و کاهش ایمنی	[۶۴]
خرچنگ ساحلی	افزایش صدای محیطی	افزایش متابولیسم و کاهش رشد و ایمنی	[۷۳]
اسب دریایی	صدای کشتی	افزایش متابولیسم	[۷۴]
باس دریایی اروپایی	شلیک تفنگ هوای لرزه نگاری	افزایش متابولیسم	[۷۵]
باس دریایی اروپایی و ماهی سر طلایی	صدای قایق و کشتی	افزایش متابولیسم و تحریک حرکتی	[۶]
نهنگ سفید	دستگاه تولید صدای آزمایشی	افزایش ضربان قلب	[۷۶]
خرچنگ عنکبوتی	صدای کشتی	کاهش ایمنی	[۷۷]
باس سفید باس راهراه	عملیات کوبیدن شمع	ایجاد آسیب	[۶۷]

۵ - اقدامات لازم برای کاهش تأثیر آلودگی صوتی بر موجودات دریایی

در رابطه با آلودگی صوتی در اقیانوس ها، در ژوئن ۲۰۱۷، تعدادی از سازمان های غیردولتی و همکارانشان در کنفرانس اقیانوس سازمان

ملل متحد تعهدی داوطلبانه برای جلوگیری و کاهش آلودگی صوتی اقیانوس ها ارائه دادند. این تعهد شامل تهیه «فهرست صوتی» از منابع اصلی صدای اقیانوس های جهانی و تشکیل گروه های کاری برای اجرای این تعهد است [۷۸]. علاوه بر این، توافقنامه ACCOBAMS^۱ که در سال ۲۰۱۰ تصویب شد، به مدیریت نويزهای انسانی در دریای سیاه و آب های مدیترانه پرداخته و از امضاکنندگان توافقنامه خواسته است تا نويز را در برنامه های مدیریتی خود لحاظ کرده و در صورت لزوم آن را کاهش دهند [۷۸]. ایالات متحده اخیراً در مدیریت آلودگی صوتی اقیانوسی پیشرفت هایی داشته است. اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA^۲) که بر محیط زیست دریایی ایالات متحده نظارت می کند، اولین نقشه راه استراتژی نويز اقیانوسی خود را در سال ۲۰۱۶ منتشر کرد که به بررسی های لرزه ای در سطح سیاست های فدرال پرداخته است. این اداره همچنین توصیه هایی فنی در زمینه آکوستیک برای تعیین سطوح نويز منتشر کرده است که ممکن است بر حساسیت شنوایی پستانداران دریایی تأثیر بگذارد [۷۹]. برخی از کشورها گام های مهمی برای مقابله با اثرات بالقوه آلودگی صوتی لرزه ای برداشته اند [۸۰، ۱۱]. در راستای رویکرد نظارتی برای بررسی های لرزه ای، کمیسیون ارزیابی اثرات زیست محیطی ایتالیا، که مسئول تنظیم مجوزهای فعالیت های نفت و گاز در آب های این کشور در وزارت محیط زیست و حفاظت ایتالیا است، اقدام به تعیین الزامات خاصی کرد. در سال ۲۰۱۵، این کمیسیون مطالعاتی را برای مدت ۶۰ روز قبل و بعد از انجام بررسی های لرزه ای به منظور ارزیابی تراکم و تعداد پستانداران دریایی در آن مناطق انجام داد [۸۱].

مناطق حفاظت شده دریایی (MPAs^۳) می توانند به کاهش اثرات منفی سر و صدای انسان زاد بر برخی از حیوانات کمک کنند. برای مدیریت بهتر این مناطق، می توان آن ها را بر اساس الگوهای توزیع حساس ترین گونه ها تعیین کرد. دریای مدیترانه به عنوان پرکاربردترین مسیر دریایی شناخته می شود، که به تبع آن موجب افزایش آلودگی صوتی در این منطقه شده است [۸۲، ۸۳]. در سال ۲۰۱۸، اسپانیا یک کریدور زیرآبی ۱۳۵۰ کیلومتری در دریای مدیترانه را به عنوان منطقه حفاظت شده دریایی معرفی کرد. این منطقه به عنوان زیستگاه طبیعی چندین گونه خزنده و پستاندار دریایی شناخته می شود. همچنین، این منطقه مسیر عبور ضروری گونه ای از نهنگ ها به نام بالدار است که توسط اتحادیه بین المللی حفاظت از طبیعت (IUCN^۴) به عنوان گونه ای در خطر انقراض طبقه بندی شده است. مراکش، به عنوان یک کشور در حال توسعه، گام های قابل توجهی در جهت حفاظت از مناطق دریایی خود و

^۴ - International Union for Conservation of Nature

^۱ - The Agreement on the Conservation of Cetaceans of the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area

^۲ - National Oceanic and Atmospheric Administration

^۳ - Marine protected areas

است. به عنوان مثال، دما و فشار آب و گازهای به کار رفته در این روش می‌توانند بر کارایی آن تأثیر بگذارند [۹۰].

اقدامات دولتی در این زمینه می‌تواند شامل مقررات اجرایی برای نظارت بر کاهش آلودگی صوتی در دریا، الزام به استفاده از تجهیزات کم‌صدا، کاهش فعالیت‌های صنعتی و تجاری در دریا، کاهش سرعت کشتی‌ها و آموزش عمومی باشد [۹۱]. نظارت صوتی غیرفعال نیز یکی از راهکارهای اصلی است که شامل استفاده از میکروفون‌های زیرآب یا هیدروفون‌ها برای ضبط صداهای پستانداران دریایی و دیگر موجودات در مجاورت زیردریایی‌ها می‌شود. با تحلیل این ضبط‌ها، محققان می‌توانند اطلاعات بیشتری درباره رفتار و ارتباطات موجودات دریایی و اثرات آلودگی صوتی زیردریایی بر این فعالیت‌ها به دست آورند [۸۲].

سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO^۵) راهنمایی‌هایی برای کاهش تأثیرات بالقوه سونار فعال بر پستانداران دریایی، به‌ویژه نهنگ‌ها و دلفین‌ها در مناطق حضورشان ارائه کرده است [۹۲]. این راهنما در "دستورالعمل‌های IMO برای جلوگیری از مرگ و میر پستانداران دریایی و صدمات ناشی از بررسی‌های لرزه‌ای با استفاده از انفجارهای زیرآب و دیگر منابع صوتی" ذکر شده است که آخرین بار در سال ۲۰۰۹ به‌روزرسانی شد. دستورالعمل‌ها به اپراتورهای سونار فعال توصیه می‌کنند که برای کاهش خطر آسیب به پستانداران دریایی رویکردی احتیاطی اتخاذ کنند. این موارد شامل موارد زیر است [۹۳]:

- انجام ارزیابی خطر در مناطق احتمال حضور پستانداران دریایی قبل از آغاز عملیات سونار فعال
- استفاده از بهترین فناوری‌ها و تکنیک‌ها برای شناسایی و نظارت بر حضور پستانداران دریایی در نزدیکی عملیات سونار فعال.
- کاهش سطح خروجی یا خاموش کردن سونار فعال در صورتی که پستانداران دریایی در محدوده خاصی از عملیات شناسایی شوند.
- طراحی و انجام بررسی‌ها به گونه‌ای که مدت زمان و شدت عملیات سونار فعال به حداقل برسد.
- آموزش پرسنل درباره تأثیرات بالقوه سونار فعال بر پستانداران دریایی و چگونگی کاهش این تأثیرات. • انجام پایش پس از عملیات برای ارزیابی اثرات صوتی بر پستانداران دریایی.
- انجام پایش پس از اثرات بالقوه صوتی بر روی پستانداران دریایی.

مشارکت در حفظ حیات دریایی برداشته است. اقدامات مختلفی برای کاهش تأثیر آلودگی صوتی بر موجودات دریایی انجام شده است [۸۴].

اجتناب از انفجار: انفجارها تولید صدا های ناگهانی می‌کنند، مانند صدای شلیک گلوله هوایی که در بررسی‌های لرزه‌ای یا انفجارهای معدنی استفاده می‌شود. مطالعات مختلف اثرات منفی و کشنده صداهای بلند را بر روی گونه‌ها و اکوسیستم‌ها به اثبات رسانده‌اند [۸۵].

محرومیت فصلی و جغرافیایی: حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی در برابر اثرات آلودگی صوتی باید با رعایت فصول خاص و پراکندگی جغرافیایی گونه‌ها انجام شود. در طول دوره‌های تخم‌ریزی و زایش، باید از تمام منابع تولید صدا اجتناب کرد. همچنین ضروری است که فعالیت‌های مولد سر و صدا از مناطق تغذیه و مهاجرت آسیب‌پذیرترین گونه‌ها دور شوند تا اکوسیستم دریایی تا حد ممکن حفظ گردد [۸۶].

موتورهای شناور: موتورهای شناورهای تجاری و ماهیگیری یکی از منابع اصلی تولید صدا هستند. کاهش اثرات نویز ناشی از این موتورها می‌تواند از طریق نوآوری‌های فناوری و استفاده از موتورهای بی‌صدا انجام شود. همچنین نگهداری و تعمیر شناورها برای جلوگیری از سر و صدای ناشی از تجهیزات قدیمی و گرفتگی آن‌ها توسط رسوبات زیستی، امری ضروری است. موتورهای چهارزمانه تأثیر کمتری بر گونه‌های دریایی دارند. همچنین استفاده از سیستم‌های محرکه کم‌صداتر مانند موتورهای الکتریکی یا سلول‌های سوختی می‌تواند صدای کمتری نسبت به موتورهای دیزلی سنتی تولید کند [۸۳]. اجرای فناوری‌های کم‌صدا (مانند موتورهای الکتریکی برای شناورها) ممکن است در کوتاه مدت ۲۰-۳۰٪ گران‌تر از سیستم‌های متعارف باشد، اما مطالعات نشان می‌دهد این سرمایه‌گذاری در بلندمدت به دلیل کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش عمر تجهیزات، توجیه اقتصادی دارد [۱، ۲۴، ۸۷]. همچنین، بر اساس گزارش سازمان بین‌المللی دریانوردی، کاهش سرعت کشتی‌ها علاوه بر کاهش ۴۰-۵۰٪ آلودگی صوتی، موجب صرفه‌جویی ۱۰-۱۵٪ در مصرف سوخت می‌شود [۸۸، ۸۹].

موانع فیزیکی: این روش که به عنوان "مانع حبابی" شناخته می‌شود، یکی از تکنیک‌های مهم برای کاهش فشار صوتی ناشی از انفجار است. در این فرآیند، یک لوله نازل به کمپرسور متصل شده و حباب‌هایی از آن تولید می‌شود. این حباب‌ها به عنوان مانعی برای انتشار فشار صوتی در آب عمل کرده و آن را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. اثرگذاری این مانع به عواملی مانند اندازه حباب‌ها و عرض دیوارهای حبابی بستگی دارد [۸۶]. همچنین، ویژگی‌های ترمودینامیکی ارتباط حباب-آب در این روش تأثیرگذار

مهم است که اشاره شود این دستورالعمل ها از نظر قانونی الزام آور نیستند و به عنوان چارچوبی برای بهترین شیوه ها در کاهش تأثیر سونار فعال بر پستانداران دریایی عمل می کنند. برخی کشورها این دستورالعمل ها را در مقررات خود گنجانده اند، در حالی که برخی دیگر مقررات یا دستورالعمل های خاص خود را تدوین کرده اند.

علاوه بر راهکارهای متداول، فناوری های نوظهور و استراتژی های مدیریتی پیشرفته ای برای کاهش آلودگی صوتی نیز می توانند به کاهش آلودگی صوتی در محیط های آبی کمک کنند. برای مثال طراحی بدنه های چندلایه با مواد جاذب صوت (مانند فوم های آکوستیک متخلخل) می تواند انتشار صوت از شناورها را تا ۱۵ دسی بل را کاهش دهد [۹۴]. همچنین، رویکرد حفاظت صوتی پویا هیدروفون هوشمند، امکان اعمال محدودیت های صوتی موقت در زمان حضور گونه های حساس را فراهم می کند [۹۵]. در سطح بین المللی، ابتکاراتی مانند ایجاد مناطق حفاظت شده صوتی، می تواند موجب کاهش آلودگی صوتی در این محیط ها بشود [۹۶]. این راهکارهای نوین، در کنار آموزش اپراتورها و توسعه استانداردهای ساخت تجهیزات کم صدا، می توانند تأثیرات منفی آلودگی صوتی را به حداقل برسانند.

۶- چالش ها و تناقضات پژوهشی در مطالعات آلودگی صوتی دریایی

با وجود پیشرفت های چشم گیر در تحقیقات مربوط به آلودگی صوتی دریایی، تناقضات و چالش های متعددی در یافته های موجود مشاهده می شود که نیاز به بررسی دقیق تری دارد. یکی از مهم ترین چالش ها، تفاوت در روش شناسی مطالعات است؛ به طوری که برخی پژوهش ها تأثیرات شدید آلودگی صوتی بر رفتار و فیزیولوژی آبزیان را گزارش می دهند، در حالی که مطالعات دیگر تغییرات محسوسی را ثبت نکرده اند. این تفاوت ها ممکن است ناشی از متغیر های کنترل نشده مانند تفاوت در گونه های مورد مطالعه، شرایط آزمایشگاهی در مقابل محیط طبیعی، یا تفاوت در شدت و مدت زمان مواجهه با صدا باشد.

چالش دیگر، تناقض در آستانه های ایمن صوتی برای گونه های مختلف است. برای مثال، برخی تحقیقات نشان می دهند که شدت های بالای ۱۵۰ دسی بل برای پستانداران دریایی خطرناک است، در حالی که برخی دیگر حتی سطوح پایین تر (۱۲۰-۱۳۰ دسی بل) را نیز مضر می دانند. این اختلاف نظر ها می تواند ناشی از تفاوت در حساسیت گونه ها، تفاوت در معیار های سنجش آسیب (رفتاری در مقابل فیزیولوژیک)، یا حتی تفاوت در روش های اندازه گیری صوت در محیط های آبی باشد.

همچنین، تأثیر تجمعی نویز های مختلف به خوبی درک نشده است. در حالی که برخی مطالعات بر تأثیرات مخرب صدا های ضربیه ای

(مانند انفجار یا سونار) تمرکز دارند، اثرات بلند مدت صدا های مداوم با شدت پایین (مانند ترافیک کشتی ها) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، تعامل بین آلودگی صوتی و سایر استرسور های محیطی مانند تغییرات دمایی یا اسیدی شدن اقیانوس ها هنوز به صورت جامع بررسی نشده است.

در نهایت، چالش های اجرایی در کاهش آلودگی صوتی نیز وجود دارد؛ از جمله هزینه بالای فناوری های کم صدا، عدم وجود قوانین الزام آور بین المللی، و تضاد منافع بین صنایع دریایی و نهاد های حفاظت از محیط زیست. این تناقضات و چالش ها نشان می دهد که برای دستیابی به درک جامع تری از آلودگی صوتی دریایی، نیاز به هماهنگی بیشتر در روش شناسی، انجام مطالعات بلند مدت، و توسعه استانداردهای جهانی برای پایش و کنترل صدا در محیط های آبی وجود دارد.

۷- مسیرهای پژوهشی آینده

با توجه به گستردگی تأثیرات آلودگی صوتی بر اکوسیستم های دریایی و کمبود مطالعات در برخی زمینه ها، پیشنهاد می شود تحقیقات آینده بر چند محور اصلی تمرکز کنند. نخست، بررسی اثرات بلند مدت صدا های کم شدت اما مداوم مانند ترافیک کشتی ها بر رفتار و فیزیولوژی گونه های دریایی، بخصوص گونه های کمتر مطالعه شده مانند بی مهرگان و مراحل لاروی ماهیان، ضروری است. همچنین، ارزیابی تأثیر تجمعی نویز های انسان ساز در ترکیب با سایر استرسور های محیطی مانند تغییرات دمایی یا اسیدی شدن اقیانوس ها می تواند به درک جامع تری از این پدیده منجر شود.

از سوی دیگر، مطالعه گونه های غیرپستاندار مانند ماهیان کفزی، نرم تنان و سخت پوستان که نقش کلیدی در زنجیره غذایی دارند اما داده های محدودی درباره حساسیت شنوایی آن ها وجود دارد، از اولویت های تحقیقاتی آینده است. پژوهش های تجربی بر روی مراحل لاروی آبزیان نیز می تواند آسیب پذیری این موجودات را در برابر آلودگی صوتی روشن کند. در حوزه فناوری، توسعه روش های کاهش نویز مانند طراحی موانع حبابی و عایق های آکوستیک برای پروژه های عمرانی دریایی، ساخت کشتی ها و شناور های کم صدا با استفاده از موتور های الکتریکی، و به کارگیری تجهیزات پیشرفته برای پایش بلادرنگ صدا های زیرآبی از جمله راهکار های امید بخش هستند.

مدیریت یکپارچه و تدوین قوانین بین المللی نیز نقش حیاتی در کنترل آلودگی صوتی دارد. ایجاد بانک های داده جهانی از منابع آلودگی صوتی، تدوین استانداردهای الزام آور برای شدت مجاز صدا در فعالیتهای دریایی، و توسعه پروتکل های نظارتی برای اجرای مؤثر قوانین از جمله اقدامات ضروری در این زمینه محسوب می شوند. علاوه بر این، روش های نوین پایش و ارزیابی مانند نصب

quality through porous concrete: characteristics, absorption isotherms and statistical analysis, Journal of Building Pathology and Rehabilitation Vol. 9, p. 27. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00379-y>

3- NAJARI, S., DELNAVAZ, M. and BAHRAMI, D.,(2023), *Application of electrocoagulation process for the treatment of reactive blue 19 synthetic wastewater: Evaluation of different operation conditions and financial analysis*, Chemical Physics Letters Vol. 832, p. 140897. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140897>

4- SLABBEKOORN, H., et al.,(2010), *A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish*, Trends in ecology & evolution Vol. 25, p. 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005>

5- ANDREW, R. K., HOWE, B. M., MERCER, J. A. and DZIECIUCH, M. A.,(2002), *Ocean ambient sound: comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast*, Acoustics research letters online Vol. 3, p. 65-70. <https://doi.org/10.1121/1.1461915>

6- BUSCAINO, G., et al.,(2010), *Impact of an acoustic stimulus on the motility and blood parameters of European sea bass (Dicentrarchus labrax L.) and gilthead sea bream (Sparus aurata L.)*, Marine environmental research Vol. 69, p. 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.09.004>

7- SLOTT, A., HANSEN, K., DALEN, J. and ONA, E.,(2004), *Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast*, Fisheries Research Vol. 67, p. 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2003.09.046>

8- BERNALDO DE QUIRÓS, Y., et al.,(2019), *Advances in research on the impacts of anti-submarine sonar on beaked whales*, Proceedings of the Royal Society B Vol. 286, p. 20182533. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2533>

9- NAJARI, S., DORODIAN, M., AJOURI, M. R. and OMIDI, BIJAN,(2021), *The Importance of SARS-CoV-2 Detection in Wastewater*, Journal of Biosafety Vol. 14, p. 1-18. <http://journalofbiosafety.ir/article-1-429-en.html>

10- WILLIAMS, R., CLARK, C., PONIRAKIS, D. and ASHE, E.,(2014), *Acoustic quality of critical habitats for three threatened whale populations*, Animal conservation Vol. 17, p. 174-185. <https://doi.org/10.1111/acv.12076>

11- CHAHOURI, A., ELOUAHMANI, N. and OUCHENE, H.,(2022), *Recent progress in marine noise pollution: A thorough review*, Chemosphere Vol. 291, p. 132983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132983>

12- DOOLING, R. J., LEEK, M. R. and POPPER, A. N.,(2015), *Effects of noise on fishes: What we can learn from humans and birds*, Integrative zoology Vol. 10, p. 29-37. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12094>

تگ‌های صوتی بر روی آبزیان، استفاده از هیدروفون های خودکار و شبکه های حسگر زیرآبی، و توسعه آزمایش های سریع شنوایی می‌توانند داده های ارزشمندی را در اختیار محققان قرار دهند.

در نهایت، افزایش آگاهی عمومی و مشارکت جامعه از طریق طراحی کمپین های آموزشی و تشویق بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در فناوری های سبز دریایی می‌تواند به کاهش آلودگی صوتی کمک کند. پر کردن شکاف های تحقیقاتی فوق و تقویت همکاری بین‌المللی میان محققان، دولت ها و صنایع، کلید دستیابی به راهکارهای عملیاتی برای حفاظت از تنوع زیستی دریایی خواهد بود.

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی تأثیر آلودگی صوتی دریایی بر موجودات مختلف و به ویژه پستانداران دریایی پرداخته شد. نتایج نشان داد که این گونه ها به دلیل وابستگی شدید به شنوایی، در برابر صداهای ناشی از فعالیت‌های انسانی به شدت آسیب‌پذیر هستند. پیامدهای مشاهده شده شامل سرگردانی، استرس، اختلال در رفتارهای مهاجرتی و در برخی موارد مرگ بوده است. همچنین، از تحلیل‌ها مشخص شد که برای کاهش این اثرات مخرب، لازم است مجموعه ای از اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی در مقیاس جهانی دنبال شود. این اقدامات شامل توسعه فناوری های کم صداتر برای کشتی‌ها و زیردریایی‌ها، طراحی ملخ های هیدرودینامیکی پیشرفته، استفاده از پوشش های کاهنده نویز، به‌کارگیری حائل های هوایی در عملیات پر سر و صدا، و بهینه سازی مسیرهای کشتیرانی برای دوری از زیستگاه های حساس است. علاوه بر این، ضرورت تصویب و اجرای مقررات بین‌المللی در زمینه کنترل و نظارت بر سطح نویز دریایی مورد تأکید قرار گرفت.

باید در نظر داشت، نقش تحقیقات بین‌المللی در توسعه راهبرد های نوین کاهش آلودگی صوتی بسیار حائز اهمیت است. این تحقیقات می‌توانند زمینه ساز راهکار هایی باشند که ضمن حفظ کارایی عملیات های نظامی و علمی در دریا، آسیب کمتری به اکوسیستم های دریایی وارد کنند. به طور کلی، نتایج تحقیق حاضر بیانگر آن است که دستیابی به تعادل میان پیشرفت های فناورانه و حفاظت از محیط زیست دریایی امکان‌پذیر بوده و با بهره‌گیری از همکاری های جهانی و فناوری های نوین، می‌توان به کاهش اثرات آلودگی صوتی و بهره برداری پایدار از منابع دریایی دست یافت.

۹- مراجع

1- HILDEBRAND, J. A.,(2009), *Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean*, Marine Ecology Progress Series Vol. 395, p. 5-20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>

2- DELNAVAZ, M., BECHRAK, T., NAJARI, S. and SHIRGIR, B.,(2024), *Enhancing storm water runoff*

sound absorption in seawater, *Journal of Geophysical Research: Oceans* 100(C5), p. 8761-8776. <https://doi.org/10.1029/95JC00306>

26- BAILEY, H., *et al.*, (2010), *Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals*, *Marine pollution bulletin* Vol. 60, p. 888-897. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.003>

27- APEL, J. R., (2013), *Principles of ocean physics*, Elsevier, vol. 38.

28- WILCOCK, W. S., STAFFORD, K. M., ANDREW, R. K. and ODOM, R. I., (2014), *Sounds in the ocean at 1–100 Hz*, *Annual review of marine science* 6(1), p. 117-140. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172423>

29- WILLIAMS, R., ASHE, E., BLIGHT, L., JASNY, M. and NOWLAN, L., (2014), *Marine mammals and ocean noise: Future directions and information needs with respect to science, policy and law in Canada*, *Marine pollution bulletin* Vol. 86, p. 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.05.056>

30- PITCHER, T. J., GREENBERG, G. and HARAWAY, M., (1998), *Shoaling and shoaling behaviour in fishes*, *Comparative psychology: a handbook*, p. 748-760.

31- SIMMONDS, J. and MACLENNAN, D. N., (2008), *Fisheries acoustics: theory and practice*, John Wiley & Sons.

32- HELFMAN, G. S., COLLETTE, B. B., FACEY, D. E. and BOWEN, B. W., (2009), *The diversity of fishes: biology, evolution, and ecology*, John Wiley & Sons.

33- HAWKINS, A. and RASMUSSEN, K. J., (1978), *The calls of gadoid fish*, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* Vol. 58, p. 891-911. <https://doi.org/10.1017/S0025315400056848>

34- JOHANSSON, K., (2011), *Impact of anthropogenic noise on fish behaviour and ecology*, *Introductory research essay (Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Wildlife, Fish and Environmental Studies)* (12).

35- EVEREST, F. A., YOUNG, R. W. and JOHNSON, M. W., (1948), *Acoustical characteristics of noise produced by snapping shrimp*, *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 20, p. 137-142. <https://doi.org/10.1121/1.1906355>

36- LADICH, F. and YAN, H., (1998), *Correlation between auditory sensitivity and vocalization in anabantoid fishes*, *Journal of Comparative Physiology A* 182, p. 737-746. <https://doi.org/10.1007/s003590050218>

37- POPPER, A. N., FAY, R. R., PLATT, C. and SAND, O., (2003), *Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes*, *Sensory processing in*

13- ERBE, C. and MCPHERSON, C., (2017), *Underwater noise from geotechnical drilling and standard penetration testing*, *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 142, p. EL281-EL285. <https://doi.org/10.1121/1.5003328>

14- MCCAULEY, R. D., FEWTRELL, J. and POPPER, A. N., (2003), *High intensity anthropogenic sound damages fish ears*, *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 113, p. 638-642. <https://doi.org/10.1121/1.1527962>

15- SHANNON, G., *et al.*, (2016), *A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife*, *Biological Reviews* Vol. 91, p. 982-1005. <https://doi.org/10.1111/brv.12207>

16- KNUDSEN, V. O., WILSON, J. V. and ANDERSON, N. S., (1948), *The attenuation of audible sound in fog and smoke*, *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 20, p. 849-857. <https://doi.org/10.1121/1.1906448>

17- WILSON JR, O., WOLF, S. N. and INGENITO, F., (1985), *Measurements of acoustic ambient noise in shallow water due to breaking surf*, *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 78, p. 190-195. <https://doi.org/10.1121/1.392557>

18- NYSTUEN, J. A. and FARMER, D. M., (1987), *The influence of wind on the underwater sound generated by light rain*, *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 82, p. 270-274. <https://doi.org/10.1121/1.395563>

19- DUBROVSKIY, N. and KOSTERIN, S., (1993), in *Natural Physical Sources of Underwater Sound: Sea Surface Sound (2)*, Ed[^]Eds, Springer, p. 697-709.

20- RICHARDSON, W. J., GREENE JR, C. R., MALME, C. I. and THOMSON, D. H., (2013), *Marine mammals and noise*, Academic press.

21- SOUTHALL, B. L., *et al.*, (2019), *Marine mammal noise exposure criteria: updated scientific recommendations for residual hearing effects*, *Aquatic Mammals* Vol. 45, p. 125-232. <https://doi.org/10.1121/1.4783461>

22- CASTELLOTE, M., *et al.*, (2014), *Baseline hearing abilities and variability in wild beluga whales (Delphinapterus leucas)*, *Journal of Experimental Biology* 217(10), p. 1682-1691. <https://doi.org/10.1242/jeb.093252>

23- NACHTIGALL, P. E., MOONEY, T. A., TAYLOR, K. A. and YUEN, M. M., (2007), *Hearing and auditory evoked potential methods applied to odontocete cetaceans*, *Aquatic Mammals* 33(1), p. 6.

24- WILLIAMS, R., *et al.*, (2015), *Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management*, *Ocean & Coastal Management* Vol. 115, p. 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.021>

25- BREWER, P. G., GLOVER, D. M., GOYET, C. and SHAFER, D. K., (1995), *The pH of the North Atlantic Ocean: Improvements to the global model for*

- Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Vol. 49, p. 1357-1365. <https://doi.org/10.1139/f92-151>
- 51- MOONEY, T. A., YAMATO, M. and BRANSTETTER, B. K.,(2012), *Hearing in cetaceans: from natural history to experimental biology*, Advances in marine biology Vol. 63, p. 197-246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394282-1.00004-1>
- 52- RIDGWAY, S. H., (1980), in *Animal sonar systems*, Ed^Eds, Springer, p. 483-493.
- 53- SISNEROS, J. A.,(2015), *Fish hearing and bioacoustics: an anthology in honor of Arthur N. Popper and Richard R. Fay*, Springer, vol. 877.
- 54- MENNIGEN, J. A., et al.,(2022), *Reproductive roles of the vasopressin/oxytocin neuropeptide family in teleost fishes*, Frontiers in Endocrinology 13, p. 1005863.
- 55- COUNCIL, N. R., EARTH, D. O., STUDIES, L., BOARD, O. S. and MAMMALS, C. O. P. I. O. A. N. I. T. O. O. M.,(2003), *Ocean noise and marine mammals*.
- 56- CLARK, C. W., et al.,(2009), *Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication*, Marine Ecology Progress Series 395, p. 201-222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>.
- 57- LUCKE, K., SIEBERT, U., LEPPER, P. A. and BLANCHET, M.-A.,(2009), *Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (Phocoena phocoena) after exposure to seismic airgun stimuli*, The Journal of the Acoustical Society of America 125(6), p. 4060-4070. <https://doi.org/10.1121/1.3117443>.
- 58- NACHTIGALL, P. E., SUPIN, A. Y., PAWLOSKI, J. and AU, W. W.,(2004), *Temporary threshold shifts after noise exposure in the bottlenose dolphin (Tursiops truncatus) measured using evoked auditory potentials*, Marine mammal science 20(4), p. 673-687. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01187.x>
- 59- ANDRÉ, M., et al.,(2011), *Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods*, Frontiers in Ecology and the Environment Vol. 9, p. 489-493. <https://doi.org/10.1890/100124>
- 60- FEWTRELL, J. L. and MCCAULEY, R. D.,(2012), *Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid*, Marine pollution bulletin Vol. 64, p. 984-993. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.02.009>.
- 61- TYACK, P. L., et al.,(2011), *Beaked whales respond to simulated and actual navy sonar*, PloS one Vol. 6, p. e17009. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017009>.
- 62- SCHWARZ, A. L. and GREER, G. L.,(1984), *Responses of Pacific herring, Clupea harengus pallasi, to some underwater sounds*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Vol. 41, p. 1183-1192. <https://doi.org/10.1139/f84-140>.
- aquatic environments, p. 3-38. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22628-6_1
- 38- MCDONALD, M. A., HILDEBRAND, J. A. and WIGGINS, S. M.,(2006), *Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California*, The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 120, p. 711-718. <https://doi.org/10.1121/1.2216565>
- 39- ROSS, D.,(2005), *Ship sources of ambient noise*, IEEE Journal of Oceanic Engineering 30(2), p. 257-261. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879>
- 40- BUCK, E. H.,(1995), *Acoustic Thermometry of Ocean Climate: Marine Mammal Issues*.
- 41- GISINER, R. C.,(1998), *WORKSHOP ON THE EFFECTS OF ANTHROPOGENIC NOISE IN THE MARINE ENVIRONMENT, 10-12 February 1998*.
- 42- RICHARDSON, W. J., FINLEY, K. J., MILLER, G. W., DAVIS, R. A. and KOSKI, W. R.,(1995), *Feeding, social and migration behavior of bowhead whales, balaena mysticetus, in baffin bay vs. the beaufort sea—Regions with different amounts of human activity*, Marine mammal science Vol. 11, p. 1-45. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1995.tb00272.x>
- 43- CODARIN, A., WY SOCKI, L. E., LADICH, F. and PICCIULIN, M.,(2009), *Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy)*, Marine pollution bulletin 58(12), p. 1880-1887. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.07.011>
- 44- POPPER, A. N. and HASTINGS, M. C.,(2009), *The effects of human-generated sound on fish*, Integrative zoology Vol. 4, p. 43-52. <https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2008.00134.x>
- 45- SIMARD, Y., LEPAGE, R. and GERVAISE, C.,(2010), *Anthropogenic sound exposure of marine mammals from seaways: Estimates for Lower St. Lawrence Seaway, eastern Canada*, Applied Acoustics Vol. 71, p. 1093-1098. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.012>
- 46- LAGARDÈRE, J.,(1982), *Effects of noise on growth and reproduction of Crangon crangon in rearing tanks*, Marine Biology 71(2), p. 177-185.
- 47- LOKKEBORG, S.,(1993), in *ICES Mar. Sci. Symp.* vol. 196, p. 62-67.
- 48- ENGAS, A.,(1994), *The effects of trawl performance and fish behaviour on the catching efficiency of demersal sampling trawls*, Marine fish behavior in capture and abundance estimation.
- 49- NICHOLSON, M., RACKHAM, B. and MITSON, R.,(1992), in *Proceedings of the ICES FTFB and FAST Joint Working Group Meeting, Bergen, Norway.* vol. 16.
- 50- SKALSKI, J. R., PEARSON, W. H. and MALME, C. I.,(1992), *Effects of sounds from a geophysical survey device on catch-per-unit-effort in a hook-and-line fishery for rockfish (Sebastes spp.)*, Canadian

of shore crabs to single and repeated playback of ship noise, *Biology letters* 9(2), p. 20121194. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.1194>.

75- SANTULLI, A., et al.,(1999), *Biochemical responses of European sea bass (Dicentrarchus labrax L.) to the stress induced by off shore experimental seismic prospecting*, *Marine pollution bulletin* 38(12), p. 1105-1114. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00136-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00136-8)

76- LYAMIN, O., KORNEVA, S., ROZHNOV, V. and MUKHAMETOV, L.,(2011), in *Doklady Biological Sciences*. Springer Nature BV, vol. 440, p. 275. <https://doi.org/10.1134/S0012496611050218>

77- CELI, M., et al.,(2015), *Shipping noise affecting immune responses of European spiny lobster (Palinurus elephas)*, *Canadian journal of zoology* Vol. 93, p. 113-121. <https://doi.org/10.1139/cjz-2014-0219>

78- ELLIOTT, B., READ, A., GODLEY, B., NELMS, S. and NOWACEK, D.,(2019), *Critical information gaps remain in understanding impacts of industrial seismic surveys on marine vertebrates*, *Endangered Species Research* 39, p. 247-254. <https://doi.org/10.3354/esr00968>.

79- GEDAMKE, J., et al.,(2016), *Ocean noise strategy roadmap*, Noaa. <http://cetsound.noaa.gov/ons>.

80- BRÖKER, K. C.,(2019), *An overview of potential impacts of hydrocarbon exploration and production on marine mammals and associated monitoring and mitigation measures*, *Aquatic Mammals* 45(6).

81- FOSSATI, C., MUSSI, B., TIZZI, R., PAVAN, G. and PACE, D. S.,(2017), *Italy introduces pre and post operation monitoring phases for offshore seismic exploration activities*, *Marine pollution bulletin* Vol. 120, p. 376-378. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.017>.

82- ERBE, C., DUNLOP, R. and DOLMAN, S., (2018), in *Effects of anthropogenic noise on animals*, Ed^Eds, Springer, p. 277-309. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8574-6_10

83- WEILGART, L. S.,(2007), *The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management*, *Canadian journal of zoology* Vol. 85, p. 1091-1116. <https://doi.org/10.1139/Z07-101>

84- AZNAR, M. J.,(2018), *Spain and marine protected areas: recent developments*, *The International Journal of Marine and Coastal Law* Vol. 33, p. 847-855.

85- ICHIMOAEI, G., TĂRĂBUȚĂ, O., CLINCI, C.-P. and GHERGHINA, A.,(2015), *The interaction between explosive detonation, marine mine wall and water*. <http://dx.doi.org/10.21279/1454-864X-16-I1-008>

86- KOSCHINSKI, S.,(2011), *Underwater noise pollution from munitions clearance and disposal, possible effects on marine vertebrates, and its*

63- JEPSON, P., et al.,(2003), *Gas-bubble lesions in stranded cetaceans*, *Nature* Vol. 425, p. 575-576.

64- ROMANO, T., et al.,(2004), *Anthropogenic sound and marine mammal health: measures of the nervous and immune systems before and after intense sound exposure*, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* Vol. 61, p. 1124-1134. <https://doi.org/10.1139/f04-055>.

65- GUERRA, Á., GONZÁLEZ, Á. F., PASCUAL, S. and DAWE, E. G.,(2011), *The giant squid Architeuthis: an emblematic invertebrate that can represent concern for the conservation of marine biodiversity*, *Biological Conservation* Vol. 144, p. 1989-1997. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.021>.

66- EDWARD, F., GREGG, R. G. and MAURICE, L. R.,(1988), *Impacts of the explosive removal of offshore petroleum platforms on sea turtles and dolphins*, *Marine Fisheries Review* 50.

67- CASPER, B. M., HALVORSEN, M. B., MATTHEWS, F., CARLSON, T. J. and POPPER, A. N.,(2013), *Recovery of barotrauma injuries resulting from exposure to pile driving sound in two sizes of hybrid striped bass*, *PloS one* Vol. 8, p. e73844. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073844>.

68- TERSCHEK, A., TREMBLAY, N., WANG, S. V. and BEERMANN, J.,(2025), *Anthropogenic low-frequency sound effects on resting metabolism and energy pathways in two marine benthic crustaceans*, *Marine Biology* 172(5), p. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00227-025-04634-3>

69- VAN ZYL, M. C., (2023), *Feeding ecology of southern right whales (Eubalaena australis) on the South African west coast*, University of Pretoria (South Africa). p.

70- REISINGER, R. R., JOHNSON, C. and FRIEDLAENDER, A. S., (2022), in *Marine Mammals: the Evolving Human Factor*, Ed^Eds, Springer, p. 149-192. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98100-6_5

71- EL-DAIRI, R., OUTINEN, O. and KANKAANPÄÄ, H.,(2024), *Anthropogenic underwater noise: A review on physiological and molecular responses of marine biota*, *Marine pollution bulletin* Vol. 199, p. 115978. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115978>.

72- TURCO, T., et al.,(2024), *Behavioral and ecological responses of an invasive freshwater mussel to noise pollution*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4587582>

73- ANDERSON, P. A., BERZINS, I. K., FOGARTY, F., HAMLIN, H. J. and GUILLETTE JR, L. J.,(2011), *Sound, stress, and seahorses: the consequences of a noisy environment to animal health*, *Aquaculture* Vol. 311 (1-4), p. 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.11.013>

74- WALE, M. A., SIMPSON, S. D. and RADFORD, A. N.,(2013), *Size-dependent physiological responses*

- mitigation, Marine Technology Society Journal Vol. 45, p. 80-88. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.45.6.2>.
- 87- ANDERSSON, M. H., et al., (2017), *A framework for regulating underwater noise during pile driving*, Naturvårdsverket.
- 88- DE ROBERTIS, A., HJELLVIK, V., WILLIAMSON, N. J. and WILSON, C. D., (2008), *Silent ships do not always encounter more fish: comparison of acoustic backscatter recorded by a noise-reduced and a conventional research vessel*, ICES Journal of Marine Science Vol. 65, p. 623-635. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn025>.
- 89- MERCHANT, N. D., (2019), *Underwater noise abatement: Economic factors and policy options*, Environmental science & policy 92, p. 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.014>.
- 90- SCHMIDTKE, E., NÜTZEL, B. and LUDWIG, S., (2009), in *Proceedings of the International Conference on Acoustics*. p. 269-270.
- 91- CHAHOURI, A., OUAHMANI, N. E., CHOUKRALLAH, R. and YACOUBI, B., (2019), *Physico-chemical and microbiological quality of M'Zar wastewater treatment plant effluents and their impact on the green irrigation of the Golf course*, International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture Vol. 8, p. 439-445. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00316-5>
- 92- MERCHANT, N. D., PIROTTA, E., BARTON, T. R. and THOMPSON, P. M., (2014), *Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals*, Marine pollution bulletin Vol. 78, p. 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.058>.
- 93- HOWORTH, P., (2015), *FINAL REPORT MARINE WILDLIFE MITIGATION MONITORING*.
- 94- LEAPER, R., RENILSON, M. and RYAN, C., (2014), *Reducing underwater noise from large commercial ships: current status and future directions*, Journal of Ocean Technology Vol. 9.
- 95- DUAN, S., et al., (2025), *Managing Aquaculture Noise: Impacts on Fish Hearing, Welfare, and Mitigation Strategies*, Reviews in Aquaculture Vol. 17, p. e70013. <https://doi.org/10.1111/raq.70013>.
- 96- TYACK, P. L., FRISK, G., BOYD, I., URBAN, E. and SEEYAVE, S., (2015), *International Quiet Ocean Experiment Science Plan*.