J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 47, 2025. (25-39)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Review Article

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

Sina Najari[1], 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: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.3

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/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۷، ۱۴۰۴، (۳۹-۲۵)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

مقاله مروری

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

سینا نجاری[۱]، طاهره تقی زاده فیروزجایی[۲*]

[۱] دانشجو دکتری دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، sinanajari@shahroodut.ac.ir

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

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

زیست‌بوم های دریایی

منابع صوتی انسانی

تأثیرات فیزیولوژیک و رفتاری

راهبرد های کاهش

چکیده

این مطالعه مروری به بررسی جامع آلودگی صوتی انسان‌زاد در محیط‌های دریایی و پیامد های آن بر اکوسیستم های آبی می‌پردازد. با افزایش ۸۵ درصدی فعالیت های صنعتی در دریاها طی دو دهه اخیر، آلودگی صوتی به یک تهدید جدی برای زیست‌بوم های 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 اندام های شنوایی، و کاهش جمعیت آبزیان شود. ماهی های 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 فعالیت های دریایی که نویز تولید می‌کنند، می‌پردازد. بهترین شیوه ها و اقدامات کاهشی مشخص نیز مورد توجه و ارزیابی قرار می گیرد. با توجه به افزایش روزافزون فعالیت های انسانی در اقیانوس ها، توجه به آلودگی صوتی و اتخاذ اقدامات لازم برای کاهش آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.3

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

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 صداهای غیرطبیعی در زیستگاه‌های آبی، تعادل اکوسیستم‌های دریاها را مختل کرده است [۴]. این آلودگی ناشی از فعالیت هایی مانند تردد کشتی ها، کاربرد سونارهای نظامی و تجاری، عملیات حفاری نفت و گاز، مطالعات لرزه نگاری، پروژه های عمرانی در دریا، و استفاده از ماشین‌آلاتی مانند چکش های 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، پیامد های زیانباری برای جانداران آبزی 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 مسافت های بسیار دورتری را با حداقل کاهش انرژی طی نمایند [۱۰]. علاوه بر این، متغیر هایی نظیر درجه حرارت، میزان شوری، فشار آب و چگالی آن نیز بر نحوه انتشار صوت تأثیر می‌گذارند. به همین دلیل، با توجه به پیچیدگی های رفتار امواج صوتی در محیط آبی، ارزیابی دقیق تأثیرات آلودگی صوتی بر موجودات دریایی با دشواری‌های زیادی همراه است [۱۱].

موجودات دریایی، به‌ویژه پستانداران مانند دلفین‌ها و نهنگ‌ها، برخی انواع ماهی‌ها و حتی بی‌مهرگان، برای انجام عملکردهای ضروری زندگی خود به امواج صوتی متکی هستند. فعالیت هایی 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 فعالیت های انسانی می‌تواند این مکانیسم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار دهد و عوارضی مانند تشدید تنش، رفتارهای فرار ناگهانی، انحراف از مسیرهای مهاجرت، کاهش موفقیت تولید مثلی و در موارد شدید، تلفات ناشی از قرارگیری در معرض اصوات بلند را ایجاد کند [۱۲]. پژوهش های 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 جابه‌جایی هایی می‌تواند تعادل زیستی دریا ها را برهم زده و چرخه های طبیعی تغذیه را با مشکل مواجه سازد [۴, ۱۵-۱۳].

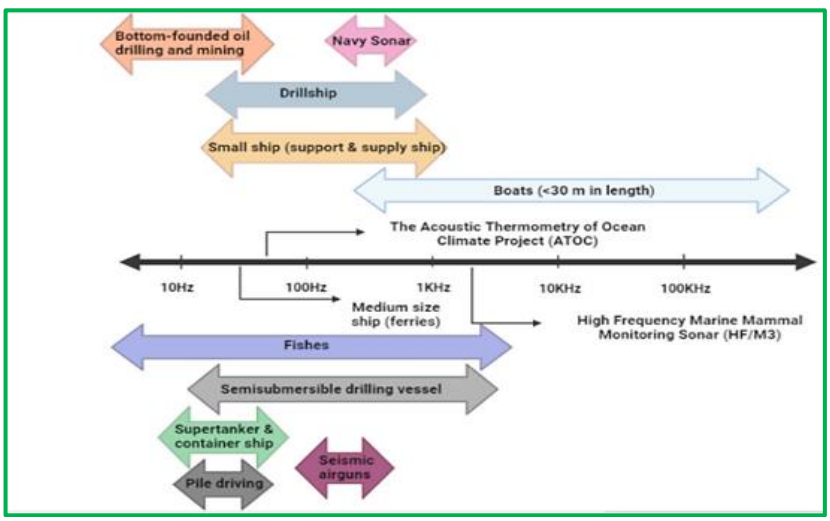
با توجه به گسترش روزافزون فعالیت های صنعتی و نظامی در دریاها و پیامد های آن بر زیستگاه های آبی، ضرورت بررسی و پایش اثرات این آلودگی پیش از پیش احساس می‌شود. در این پژوهش، به بررسی منابع صوتی زیستی و غیرزیستی در دریا، اهمیت صدا برای جانداران دریایی، اثرات مخرب آلودگی صوتی بر گونه های مختلف آبزی و همچنین راهکار های کاهش این معضل از طریق قوانین و فناوری های جدید پرداخته می‌شود. هدف از این مطالعه، ارائه درکی جامع از ابعاد مختلف آلودگی صوتی زیر دریا و شناسایی خلأ های تحقیقاتی موجود است تا بتوان راهکار های مؤثرتری برای مدیریت و کاهش اثرات منفی این نوع آلودگی در اکوسیستم های دریایی ارائه داد. در این مطالعه، داده‌ها از طریق جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده معتبر با استفاده از کلیدواژه های مرتبط با آلودگی صوتی دریایی گردآوری شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل تمرکز بر مطالعات تجربی با گروه کنترل، ارائه شواهد کمّی 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 اندازه‌گیری های فیزیولوژیک تحت شرایط کنترل شده صوتی می شدند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

۲ - انواع آلودگی صوتی و محدوده فرکانسی آن ها

اگرچه بخش عمده‌ای از پژوهش های حوزه آلودگی صوتی زیرآب به منابع انسانی اختصاص یافته است، بنابراین منابع طبیعی نیز نقش بسزایی در تولید صداهای 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 فعالیت های پستانداران دریایی، ماهیان و بی‌مهرگان می‌باشد [۱۶]. این منابع صوتی طبیعی به صورت مستمر در محیط های آبی وجود داشته‌اند، بنابراین گونه های دریایی از لحاظ تکاملی با این شرایط صوتی سازگار شده‌اند. در میان عوامل فیزیکی، اثر ترکیبی باد و امواج سطحی مهم‌ترین مکانیسم تولید صداهای طبیعی در اقیانوس ها 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 صداهای 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 فرکانس های 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 حباب های نوسانی در ستون آب محدود است، اما همین حباب ها 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، پدیده هایی نظیر شکستن یخ نیز قادر هستند سطح نویز را تا ۳۰ دسی بل افزایش داده و پالس هایی 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 محدوده های فرکانسی صداهای تولید شده توسط منابع طبیعی و انسانی به تصویر کشیده شده است [۱۱].

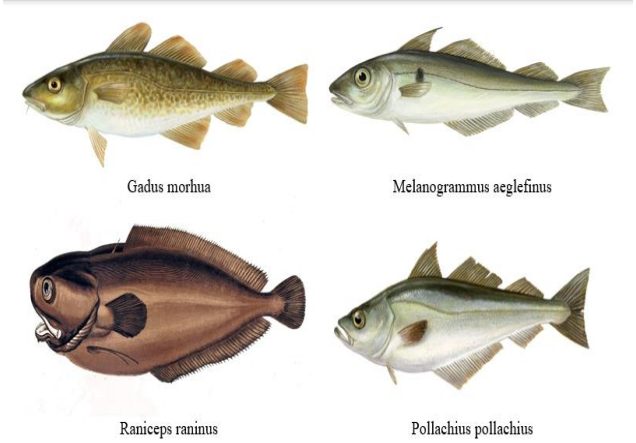
بررسی های سیستماتیک نشان می‌دهد که محدوده فرکانسی منابع آلودگی صوتی دریایی از فرکانس‌های بسیار پایین (کمتر از ۱۰ هرتز) تا فرکانس‌های بسیار بالا (بیش از ۲۰۰ کیلوهرتز) گسترده است [۱]. منابع کم فرکانس مانند ترافیک کشتی‌ها (۱۰-۵۰۰ هرتز) و عملیات لرزه‌نگاری (۵-۳۰۰ هرتز) به دلیل طول موج بلند تر، توانایی انتشار در مسافت های هزاران کیلومتری را دارند [۲۰]. در مقابل، منابع پرفرکانس مانند سونارهای نظامی (۱-۲۰۰ کیلوهرتز) و دستگاه‌های ناوبری (۳۰-۲۰۰ کیلوهرتز) اگرچه برد کوتاه تری دارند، اما تأثیر مستقیم تری بر سیستم شنوایی آبزیان می‌گذارند[۲۱] . مطالعات نشان داده‌اند که حساسیت شنوایی گونه‌های مختلف به این محدوده‌های فرکانسی به شدت متفاوت است. برای مثال، نهنگ های 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 جنبه های مهم در بررسی آلودگی صوتی در محیط‌های آبی، تحلیل محدوده فرکانسی نویزهای ایجادشده توسط منابع مختلف است. مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت های کشتیرانی و ترافیک دریایی عمدتاً در محدوده فرکانس‌های پایین تولید صدا می‌کنند، که این بازه بیشترین هم پوشانی را با محدوده شنوایی گونه های پستانداران دریایی دارد. در مقابل، فعالیت های 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، سامانه های سونار نظامی و ناوبری اغلب در بازه های فرکانسی بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز فعالیت می‌کنند که برای برخی گونه‌ها مانند دلفین‌ها و نهنگ های دندان‌دار اهمیت زیستی ویژه‌ای دارد. بنابراین، بررسی محدوده های فرکانسی آلودگی صوتی می‌تواند در درک بهتر شدت اثرات بر گونه های مختلف و طراحی راهبردهای مدیریت زیست‌محیطی نقش کلیدی ایفا کند.



شکل ۱ - فرکانس‌های صوتی ناشی فعالیت‌های انسانی [۱۱]

درک تأثیرات صوت بر اکوسیستم های دریایی مستلزم شناخت ویژگی‌های فیزیکی امواج صوتی از جمله فرکانس، طول موج و دامنه است. در این میان، رفتار انتشار صوت در محیط‌های گوناگون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در محیط دریایی، پارامترهای فیزیکی آب از قبیل دما، شوری و فشار هیدرواستاتیک به طور چشمگیری بر سرعت انتشار صوت تأثیر می‌گذارند. جالب توجه آنکه تضعیف انرژی صوتی در محدوده فرکانس‌های پایین عمدتاً تحت تأثیر pH محیط آبی قرار دارد. یافته های پژوهشی مؤید آن است که تغییرات سرعت صوت در اثر گرادیان‌های عمودی و افقی دما، شوری و فشار منجر به پدیده شکست امواج صوتی می‌گردد. پدیده تضعیف صوت با افزایش فاصله از منبع (افت انتقال صوت) از دیگر ویژگی‌های مهم انتشار صوت در محیط های آبی محسوب می‌شود [۲۵]. این تضعیف ناشی از مکانیزم های مختلفی شامل جذب توسط محیط آبی، بستر دریا و پراکندگی توسط ذرات معلق و موجودات زنده می‌باشد. 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 ویژگی‌های فیزیکی متغیر محیط، با تغییراتی همراه است و شکست امواج صوتی نیز مسیر انتشار آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد [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 پرداخته‌اند. زمانی که صوت در این لایه به سمت اعماق حرکت می‌کند، به دلیل افزایش تدریجی فشار، مسیر انتشار آن پس از عبور از ترموکلاین به سمت بالا منحرف می‌شود [۲۷, ۲۸]. این پدیده منجر به تشکیل ناحیه‌ای در اعماق دریا می‌شود که از آن با عنوان «کانال آکوستیکی عمیق» یاد می‌شود. این کانال، ناحیه‌ای 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 می‌کند. همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهد که امواج صوتی با فرکانس بالا به سرعت در آب مستهلک می‌شوند و تنها قادر به طی مسافت های نسبتاً کوتاه (در حد چند کیلومتر) هستند، در حالی که فرکانس‌های پایین می‌توانند در مقیاس‌های وسیع‌تر، حتی بیش از هزار کیلومتر، انتشار یابند [۲۹]. در محیط دریایی، امواج صوتی ناشی از ارتعاشات به صورت موج‌های فشاری و با سرعتی در حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در آب منتشر می‌شوند. بر اساس مطالعات انجام‌شده، صدای حاصل از عملیات شمع‌کوبی قابلیت شناسایی تا فاصله‌ای 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 تولیدمثل آبزیان ایفا می‌کنند [۴]. صداهای زیستی توسط گروه‌های مختلفی از موجودات دریایی از جمله ماهیان، بی‌مهرگان و پستانداران دریایی تولید می‌شود و برای فعالیت‌هایی نظیر برقراری ارتباط، مسیریابی، یافتن جفت، شکار و پژواک‌یابی اهمیت دارد [۳۰, ۳۱]. این جانداران بسته به گونه خود، مکانیسم‌های متفاوتی برای تولید صدا به کار می‌برند [۳۲]. برای نمونه، برخی ماهیان مانند گونه‌های 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 آبزی برای تولید صدا از مالش دادن بخش‌های سخت بدن خود بهره می‌برند. به عنوان نمونه، گونه‌هایی از گربه‌ماهی‌ها با استفاده از کمربند سینه‌ای خود صدا ایجاد می‌کنند. در برخی سیکلیدها نیز دندان‌های حلقی نقش تولیدکننده صوت را بر عهده دارند. همچنین، میگوی تفنگچی با ضربه زدن چنگال خود، صداهایی با فرکانس متوسط در محدوده ۲ تا ۲۴ کیلوهرتز ایجاد می‌نماید [۳۱, ۳۴-۳۶]. در کنار صداهای زیستی، صداهای غیرزیستی نیز در محیط‌های دریایی نقش مهمی دارند و اطلاعات محیطی مهمی را به موجودات دریایی منتقل می‌کنند. این صداها به‌طور کلی در دو دسته قرار می‌گیرند: صداهای طبیعی پس‌زمینه و صداهای ناشی از فعالیت‌های انسانی. عواملی مانند برخورد موج‌ها با سواحل، عبور جریان آب از روی صخره ها، افتادن قطرات باران بر سطح دریا، جزر و مد، آشفتگی‌های سطحی اقیانوس، و نیز زمین‌لرزه‌ها و آتشفشان های زیرآبی از جمله منابع رایج صداهای طبیعی پس زمینه در دریا به شمار می‌روند [۳۷].



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

در سال‌های اخیر، تنوع و فراوانی صدا های ناشی از فعالیت های انسانی در اقیانوس های آزاد و در نواحی ساحلی پرتردد به‌طور

چشمگیری افزایش یافته است [۵, ۷, ۳۸, ۳۹]. این اصوات، که حاصل فرآیند های مختلف انسانی هستند، از نظر شدت و دامنه فرکانسی تفاوت های قابل توجهی با یکدیگر دارند (جدول ۱) [۴۰-۴۲]. با توجه به ویژگی های صوتی مانند فرکانس و شدت، می‌توان صداهای انسان‌زاد را در دو گروه اصلی دسته بندی 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 نویز های 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 بررسی های 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 شدت های مختلف تولید می‌کنند، به طور گسترده توسط نیرو های دریایی، کشتی های تجاری، صنعت ماهیگیری و سازمان های تحقیقاتی دریایی به کار گرفته می‌شوند [۴۴]. سر و صدای مداوم با فرکانس پایین می‌تواند به وسیله کشتی‌ها و شناور های مختلف تولید شود [۴۳]. اگرچه تعداد کشتی های ماهیگیری از دهه ۱۹۶۰ تغییرات زیادی نداشته است، اما هنوز حدود ۱.۲ میلیون کشتی در حال فعالیت هستند [۴]. علاوه بر این، تعداد قایق های تفریحی در سواحل به سرعت در حال افزایش است. یکی دیگر از منابع فزاینده صدا های ثابت با فرکانس پایین در دریا، رشد تعداد کشتی‌های باری اقیانوس پیما است که محموله های بزرگ را به عنوان بخش حیاتی از تجارت جهانی حمل می‌کنند. تعداد این کشتی‌ها در دهه اول قرن ۲۱ به طور 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	رفرنس
حفاری و استخراج نفت از بستر دریا	4–38 Hz	119–127 dB re 1 µPa	[۴۲]
شمع‌کوبی	30–40 Hz	131–135 dB re 1 µPa	[۴۲]
کشتی حفاری	20–1000 Hz	174–185 dB re 1 µPa	[۴۲]
شناور حفاری نیمه شناور	10–4000 Hz	~154 dB re 1 µPa	[۴۲]
تفنگ‌های هوای لرزه‌ای	100–250 Hz	240–250 dB re 1 µPa	[۴۲]
پروژه ترمومتری صوتی آب و هوای اقیانوس	~75 Hz	~195 dB re 1 µPa	[۴۰]
نفتکش و کشتی کانتینری	6.8–70 Hz	180–205 dB re 1 µPa	[۴۱]
کشتی با اندازه متوسط (کشتی‌های مسافربری)	~50 Hz	150–170 dB re 1 µPa	[۴۲]
قایق	<300 Hz	~175 dB re 1 µPa	[۴۲]
کشتی کوچک	20–1000 Hz	170–180 dB re 1 µPa	[۴۲]

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 بیش ترین 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 سخت پوستان اگرچه فاقد گوش داخلی هستند، اما از طریق گیرنده های 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

برای یک گونه کاملاً مخرب باشد، در حالی که گونه دیگر را تحت تأثیر قرار ندهد [۵۵]. بنابراین، یکی از عوامل تعیین‌کننده در ارزیابی اثرات آلودگی صوتی، حساسیت شنوایی گونه های مختلف دریایی است. گونه‌های متفاوت، آستانه‌های شنوایی خاصی در بازه های فرکانسی متنوع دارند که این تفاوت در حساسیت شنوایی موجب می‌شود 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 می‌سازد.

۴- تاثیر آلودگی صوتی بر موجودات دریایی

آلودگی صوتی می‌تواند 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 آن‌ها در برابر آلودگی صوتی زیر آب می‌تواند به اختلال در زندگی دریایی منجر شود. حساسیت موجودات دریایی به آلودگی صوتی اقیانوس‌ها متفاوت است [۴۳]. در حالی که گونه‌هایی مانند نهنگ‌ها و دلفین‌ها ممکن است مقاومت بیشتری از خود نشان دهند، گونه‌هایی مانند نرم‌تن 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 زیردریایی‌ها می‌تواند این فعالیت‌های حیاتی را مختل کرده و باعث سرگردانی، استرس و حتی مرگ شود. پستانداران دریایی به دلیل آلودگی صوتی ناشی از زیردریایی‌ها ممکن است به سواحل پناه ببرند [۱۴]. علاوه بر پستانداران دریایی، آلودگی صوتی زیردریایی‌ها می‌تواند تأثیرات منفی بر ماهی‌ها و دیگر موجودات دریایی نیز بگذارد. این صداها می‌توانند رفتار و الگوهای مهاجرت آن‌ها 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 زا می‌تواند رفتار برخی از موجودات دریایی را تحت تأثیر قرار داده و باعث بروز تغییرات رفتاری نظیر واکنش‌های شگفت زده یا حواس‌پرتی 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 کرده‌اند [۶۰]. دستگاه ایرگان یک دستگاه فشار آب بالا است که با ایجاد فشار در آب، شوک های صوتی تولید می‌کند و به عنوان یک منبع سونار برای شناسایی زیر دریایی ها و کشف منابع نفت و گاز استفاده می‌شود [۶۱]. دهند و ماهی مرکب نیز واکنش‌های هشدار قابل‌توجهی 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 بلین‌ویل دچار اختلال شد [۶۱]. شوارتز و گریر همچنین دریافتند که شاه ماهی اقیانوس آرام به انواع مختلف صدا واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهد. صدای کشتی‌های بزرگ که با سرعت ثابت نزدیک می‌شوند و کشتی‌های کوچک‌تر که با شتاب به سمت آن‌ها می‌آیند، موجب استرس در شاه ماهی می‌شود. این نشان می‌دهد که شاه ماهی نسبت به صدای فرکانس بالای سونار و اکو حساس‌تر از صدای فرکانس پایین تولید شده توسط کشتی‌ها است [۶۲].

گرچه بسیاری از پستانداران دریایی مکانیزم های تطبیقی برای مقابله با سر و صدا توسعه داده‌اند، مواجهه با صدا های شدید می‌تواند تغییراتی در ترشحات غدد درون‌ریز 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، اپی‌نفرین و دوپامین پس از قرار گرفتن در معرض صدای با شدت بالا (۱۰۰ کیلو پاسکال) و انفجار لرزه‌ای (در محدوده تقریباً ۸ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال) به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد [۶۴]. در دلفین‌ها، پس از قرار گرفتن در معرض صدای انفجار (۴۴-۲۰۷ کیلو پاسکال یا ۲۱۳-۲۲۶ دسی‌بل در مقابل فشار اوج ۱ میکرو پاسکال)، افزایش قابل توجهی در آلدوسترون و کاهش چشمگیر در تعداد مونوسیت‌ها مشاهده شد [۶۴]. تحقیقات نشان داده‌اند 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 گونه‌ها و تغییرات در متابولیسم آنها می‌شود [۶۵, ۶۶].

علاوه بر ایجاد پوشش شنوایی، آسیب‌های بافتی در سیستم های شنوایی که منجر به تغییرات رفتاری می‌شود و تغییر در پراکنش و فراوانی جمعیت ها، آلودگی صوتی می‌تواند مجموعه‌ای از واکنش‌های فیزیولوژیک را نیز در موجودات دریایی تحریک کند (جدول ۲). به عنوان مثال، کاسپر و همکاران تأثیر صدای ضربه‌ای ناشی از عملیات کوبیدن شمع را بر دو گروه مختلف از ماهی باس راه‌راه دورگه بررسی کردند. نتایج نشان داد که ماهی های بزرگ‌تر نسبت به ماهی های کوچک‌تر، هم از نظر تعداد آسیب دیده و هم از نظر شدت آسیب، بیشتر در معرض آسیب قرار داشتند [۶۷]. به طور کلی آلودگی صوتی می‌تواند 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 می‌شود [۶۸]. این پاسخ استرسی در پستانداران دریایی با فعال شدن محور هیپوتالاموس هیپوفیز می‌گردد [۶۹]، که با متابولیسم پایه همراه است. متابولیسم پایه در حقیقت به این معنی است که بدن حتی در هنگام استراحت نیز کالری می‌سوزاند 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 بی‌مهرگان مانند میگوی قهوه‌ای قرارگیری در معرض صدای کشتی‌ها موجب کاهش نرخ رشد و اختلال در متابولیسم شده است [۷۱]. این تغییرات متابولیک نه تنها بر سلامت فردی موجودات تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند با کاهش موفقیت تولید مثلی و اختلال در زنجیره غذایی، تعادل کل اکوسیستم های دریایی را برهم زند [۲۴, ۷۲].

جدول ۲ - نمونه‌ای از مطالعات نشان‌دهنده تأثیرات فیزیولوژیک صدای انسان‌ساخت بر موجودات دریایی

گونه ها	نوع صدای انسان ساخت	تاثیرات	منابع
میگو قهوه ایی	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 لرزه‌نگاری	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 تاثیر آلودگی صوتی بر موجودات دریایی

در رابطه با آلودگی صوتی در اقیانوس‌ها، در ژوئن ۲۰۱۷، تعدادی از سازمان‌های غیردولتی و همکارانشان در کنفرانس اقیانوس سازمان ملل متحد تعهدی داوطلبانه برای جلوگیری و کاهش آلودگی صوتی اقیانوس‌ها ارائه دادند. این تعهد شامل تهیه «فهرست صوتی» از منابع اصلی صدای اقیانوس های جهانی و تشکیل گروه‌های کاری برای اجرای این تعهد است [۷۸]. علاوه بر این، توافقنامه ACCOBAMS[1] که در سال ۲۰۱۰ تصویب شد، به مدیریت نویزهای انسانی در دریای سیاه و آب‌های مدیترانه پرداخته و از امضاکنندگان توافقنامه خواسته است تا نویز را در برنامه‌های 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[2]) که بر محیط زیست دریایی ایالات متحده نظارت می‌کند، اولین نقشه راه استراتژی نویز اقیانوسی خود را در سال ۲۰۱۶ منتشر کرد که به بررسی‌های لرزه‌ای در سطح سیاست های فدرال پرداخته است. این اداره همچنین توصیه هایی فنی در زمینه آکوستیک برای تعیین سطوح نویز 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 لرزه‌ای برداشته‌اند [۱۱, ۸۰]. در راستای رویکرد نظارتی برای بررسی‌های لرزه‌ای، کمیسیون ارزیابی اثرات زیست محیطی ایتالیا، که مسئول تنظیم مجوزهای فعالیت‌های نفت و گاز در آب‌های 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 بررسی‌های لرزه‌ای به منظور ارزیابی تراکم و تعداد پستانداران دریایی در آن مناطق انجام داد [۸۱].

مناطق حفاظت‌شده دریایی (MPAs[3]) می‌توانند به کاهش اثرات منفی سر و صدای انسان‌زاد بر برخی از حیوانات کمک کنند. برای مدیریت بهتر این مناطق، می‌توان آن‌ها را بر اساس الگوهای توزیع حساس‌ترین گونه ها تعیین کرد. دریای مدیترانه به عنوان پرکاربردترین مسیر دریایی شناخته می‌شود، 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 حفاظت‌شده دریایی معرفی کرد. این منطقه به عنوان زیستگاه طبیعی چندین گونه خزنده و پستاندار دریایی شناخته می‌شود. همچنین، این منطقه مسیر عبور ضروری گونه‌ای از نهنگ ها به نام بالدار است که توسط اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت (IUCN[4]) به عنوان گونه‌ای 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

[1] - The Agreement on the Conservation of Cetaceans of the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area
[2] - National Oceanic and Atmospheric Administration
[3] - Marine protected areas
[4] -International Union for Conservation of Nature

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 بررسی های لرزه‌ای یا انفجارهای معدنی استفاده می‌شود. مطالعات مختلف اثرات منفی و کشنده صداهای بلند را بر روی گونه ها 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 گونه ها انجام شود. در طول دوره های تخم ریزی و زایش، باید از تمام منابع تولید صدا اجتناب کرد. همچنین ضروری است که فعالیت های 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 شناور های 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 شناور ها 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 سیستم های محرکه کم‌صداتر مانند موتورهای الکتریکی یا سلول‌های سوختی می‌تواند صدای کمتری نسبت به موتورهای دیزلی سنتی تولید کند [۸۳]. اجرای فناوری های کم‌صدا (مانند موتورهای الکتریکی برای شناورها) ممکن است در کوتاه مدت ۲۰-۳۰٪ گران‌تر از سیستم‌های متعارف باشد، اما مطالعات نشان می‌دهد این سرمایه گذاری در بلند مدت 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 تکنیک های 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 حباب ها و عرض دیوارهای حبابی بستگی دارد [۸۶]. همچنین، ویژگی‌های ترمودینامیکی ارتباط حباب-آب در این روش تأثیرگذار 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 فعالیت های صنعتی و تجاری در دریا، کاهش سرعت کشتی ها و آموزش عمومی باشد [۹۱]. نظارت صوتی غیرفعال نیز یکی از راهکار های اصلی است که شامل استفاده از میکروفون‌های زیرآب یا هیدروفون ها برای ضبط صداهای پستانداران دریایی و دیگر موجودات در مجاورت زیردریایی ها می‌شود. با تحلیل این ضبط ها، محققان می‌توانند اطلاعات بیشتری درباره رفتار و ارتباطات موجودات دریایی و اثرات آلودگی صوتی زیردریایی بر این فعالیت‌ها به دست آورند [۸۲].

سازمان بین المللی دریانوردی (IMO[5]) راهنمایی هایی برای کاهش تاثیرات بالقوه سونار فعال بر پستانداران دریایی، به‌ویژه نهنگ ها و دلفین ها در مناطق حضورشان ارائه کرده است [۹۲]. این راهنماه ا 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 آخرین‌بار 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 بررسی ها 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.

[5] - International Maritime Organization

مهم است که اشاره شود این دستورالعمل ها از نظر قانونی الزام‌آور نیستند و به‌عنوان چارچوبی برای بهترین شیوه ها در کاهش تأثیر سونار فعال بر پستانداران دریایی عمل می‌کنند. برخی کشورها این دستورالعمل‌ها را در مقررات خود گنجانده‌اند، در حالی که برخی دیگر مقررات یا دستورالعمل‌های خاص خود را تدوین کرده‌اند.

علاوه بر راهکارهای متداول، فناوری‌های نوظهور و استراتژی‌های مدیریتی پیشرفته‌ای 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 فوم‌های آکوستیک متخلخل) می‌تواند انتشار صوت از شناورها را تا ۱۵ دسی بل را کاهش دهد [۹۴]. همچنین، رویکرد حفاظت صوتی پویا هیدروفون هوشمند، امکان اعمال محدودیت‌های صوتی موقت در زمان حضور گونه‌های حساس را فراهم می‌کند [۹۵]. در سطح بین‌المللی، 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، می‌توانند تأثیرات منفی آلودگی صوتی را به حداقل برسانند.

۶- چالش‌ها 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 می‌شود 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 می‌دهند، در حالی که مطالعات دیگر تغییرات محسوسی را ثبت نکرده‌اند. 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 می‌دهند که شدت های بالای ۱۵۰ دسی‌بل برای پستانداران دریایی خطرناک است، در حالی که برخی دیگر حتی سطوح پایین‌تر (۱۲۰-۱۳۰ دسی‌بل) را نیز مضر می‌دانند. این اختلاف نظرها می‌تواند 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 محیط‌های آبی باشد.

همچنین، تأثیر تجمعی نویز های مختلف به خوبی درک نشده است. در حالی که برخی مطالعات بر تأثیرات مخرب صدا های ضربه‌ای (مانند انفجار یا سونار) تمرکز دارند، اثرات بلند مدت صدا های مداوم با شدت پایین (مانند ترافیک کشتی‌ها) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، تعامل بین آلودگی صوتی و سایر استرسورهای محیطی مانند تغییرات دمایی یا اسیدی شدن اقیانوس‌ها هنوز به‌صورت جامع بررسی نشده است.

در نهایت، چالش های اجرایی در کاهش آلودگی صوتی نیز وجود دارد؛ از جمله هزینه بالای فناوری های کم‌صدا، عدم وجود قوانین الزام‌آور بین‌المللی، و تضاد منافع بین صنایع دریایی و نهاد های حفاظت از محیط زیست. این تناقضات و چالش ها نشان می‌دهد که برای دستیابی به درک جامع تری از آلودگی صوتی دریایی، نیاز به هماهنگی بیشتر در روش‌شناسی، انجام مطالعات بلندمدت، و توسعه استاندارد های جهانی برای پایش و کنترل صدا در محیط‌های 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 می‌شود 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 بی‌مهرگان و مراحل لاروی ماهیان، ضروری است. همچنین، ارزیابی تأثیر تجمعی نویزهای انسان ساز در ترکیب با سایر استرسور های محیطی مانند تغییرات دمایی یا اسیدی شدن اقیانوس ها می تواند به درک جامع‌تری از این پدیده منجر شود.

از سوی دیگر، مطالعه گونه های غیرپستاندار مانند ماهیان کفزی، نرم‌تنان و سخت پوستان که نقش کلیدی در زنجیره غذایی دارند اما داده های محدودی درباره حساسیت شنوایی آن‌ها وجود دارد، از اولویت های تحقیقاتی آینده است. پژوهش های تجربی بر روی مراحل لاروی آبزیان نیز می‌تواند آسیب‌پذیری این موجودات را در برابر آلودگی صوتی روشن کند. در حوزه فناوری، توسعه روش های کاهش نویز مانند طراحی موانع حبابی و عایق‌های آکوستیک برای پروژه های عمرانی دریایی، ساخت کشتی ها و شناور های کم‌صدا 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 بین‌المللی نیز نقش حیاتی در کنترل آلودگی صوتی دارد. ایجاد بانک های داده جهانی از منابع آلودگی صوتی، تدوین استانداردهای الزام‌آور برای شدت مجاز صدا در فعالیت های دریایی، و توسعه پروتکل های نظارتی برای اجرای مؤثر قوانین از جمله اقدامات ضروری در این زمینه محسوب می‌شوند. علاوه بر این، روش های نوین پایش و ارزیابی مانند نصب

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. پیامد های مشاهده شده شامل سرگردانی، استرس، اختلال در رفتارهای مهاجرتی و در برخی موارد مرگ بوده است. همچنین، از تحلیل ها 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. علاه 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 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- SLOTTE, 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., DOROUDIAN, 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 conservationVol. 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,* ChemosphereVol. 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

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., WYSOCKI, 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
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 an 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*.