مقاله مروری

شمع‌کوبی و سیمای صوتی خلیج‌فارس: مرور پیامدهای آکوستیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی

سعید شفیعی ثابت*
استادیار، گروه شیلات دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان
s.shafiei.sabet@guilan.ac.ir

مرضیه امینی فرد
دانشجوی دکتری بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان
aminifard@msc.guilan.ac.ir

زهرا سمندر
دانشجوی ارشد بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان
Zahrasamandar@webmail.guilan.ac.ir

فاطمه علیزاده لادمخی
دانشجوی دکتری بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان
f.alizadeh@webmail.guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲

چکیده

فعالیت‌های انسانی در مناطق دریایی، به‌ویژه عملیات شمع‌کوبی[1] و سایر فرآیندهای صنعتی مرتبط با ساخت و بهره‌برداری پالایشگاه‌ها، موجب ایجاد منابع صوتی شدید زیرآبی می‌شوند که می‌توانند تأثیرات جدی بر زیستگاه‌های دریایی و گونه‌های آبزی داشته باشند. عملیات شمع‌کوبی می‌تواند اصوات ضربه‌ای با تراز فشار صوتی بیش از dB re ۲۲۰μPa@1m تولید کند. نوفه تولیدشده ناشی از عملیات شمع‌کوبی می‌تواند موجب آسیب‌های فیزیکی، کاهش موقت یا دائمی توان شنوایی، و بروز پاسخ‌های اجتنابی رفتاری در جانداران دریایی شود. خلیج‌فارس به‌عنوان یکی از مناطق مهم جغرافیایی ایران با اهمیت اقتصادی و زیست‌محیطی، تاکنون از منظر سیمای صوتی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین اطلاعات کافی درباره شدت و پراکندگی این اصوات در محیط‌های آبی کشور در دسترس نیست. این مقاله مروری با هدف معرفی شمع‌کوبی به‌عنوان یک منبع صوتی عمده در خلیج‌فارس و بررسی پیامدهای آن بر پایداری اکوسیستم‌های دریایی، اهمیت انجام مطالعات سیستماتیک سیمای صوتی در آب‌های ایران، به‌ویژه خلیج‌فارس را مورد تأکید قرار می‌دهد. فقدان شناخت دقیق سیمای صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌تواند مانع از مدیریت مؤثر و حفاظت از گونه‌های حساس آبزی شود. درنهایت، نیاز فوری به پژوهش‌های میدانی، تحلیل فرکانسی صوت و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی مطرح‌شده است تا بتوان سیاست‌های حفاظتی مؤثرتری با توسعه همکاری‌ها در سطح ملی و بین‌المللی برای حفظ این منطقه آبی ویژه طراحی نمود.

واژگان کلیدی: سیمای صوتی، آلودگی صوتی زیر آبی، اکوسیستم‌های دریایی

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

افزایش فعالیت‌های انسانی در محیط‌های دریایی طی دهه‌های اخیر موجب تغییر چشمگیر در ساختار طبیعی سیمای صوتی دریاها شده است [۱]. در طی چند دهه گذشته، تغییرات گسترده در کاربری سواحل و افزایش فعالیت‌های عمرانی دریایی همچنین توسعه صنعتی و طرح‌های عمرانی در سواحل و بستر این پهنه آبی، باعث شده است تا آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی در کنار سایر منابع آلوده‌کننده (برای مثال فاضلاب‌های کشاورزی، صنعتی) به یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سیمای صوتی محیط‌های دریایی تبدیل شوند و فشارهای متعددی بر محیط‌زیست این مناطق وارد کرده‌اند. در میان این فعالیت‌ها، شمع‌کوبی به‌عنوان یکی از قدرتمندترین و تأثیرگذارترین منابع تولید امواج صوتی زیرآب و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل برهم زننده تعادل صوتی محیط‌های دریایی شناخته می‌شوند [۲]. شمع‌کوبی برای ساخت سازه‌های ساحلی و فراساحلی انجام می‌شود و با تولید اصوات شدید و مکرر، می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر بوم صوتیات[۲] و گونه‌های وابسته به صوت بر جای گذارد. اصوات تولیدشده توسط فعالیت‌های شمع‌کوبی معمولاً فشار صوتی زیاد، شیب شروع صوت بسیار تند، طیف وسیع فرکانسی و الگوی انتشار پیچیده دارند. این ویژگی‌ها سبب می‌شود شمع‌کوبی نه‌تنها یک چالش مهندسی، بلکه یک موضوع مهم زیست‌محیطی و آکوستیکی در مقیاس جهانی تلقی شود.

خلیج‌فارس به‌عنوان یکی از زیست‌بوم‌های دریایی مهم در ایران و در منطقه جنوب غرب آسیا، میزبان تنوع زیستی غنی از گونه‌های گیاهی و جانوری و زیستگاه‌های حساس دریایی است[۳].این پهنه آبی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد هیدرولوژیک، عمق کم، تبادل محدود آب و فعالیت‌های انسانی نظیر توسعه بنادر، ساخت سازه‌های ساحلی، حفاری، احداث سکوهای نفتی و پروژه‌های عمرانی فراساحلی، با افزایش بی‌سابقه منابع صوتی مواجه شده است. از این رو خلیج‌فارس یکی از حساس‌ترین مناطق دریایی جهان به شمار می‌رود که در برابر تغییرات سیمای صوتی آسیب‌پذیر است [۴]. مطالعات محدودی بر نحوه تجزیه تحلیل اصوات و میدان‌های آکوستیکی در منطقه خلیج فارس در ایران انجام شده است [۵,۶]. باوجود اهمیت این منطقه و منابع صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی گسترده، دانش موجود درباره ویژگی‌های آکوستیکی شمع‌کوبی و نقش آن در شکل‌دهی سیمای صوتی خلیج‌فارس همچنان محدود و عمدتاً مربوط به مناطق سواحل کشورهای عربی این حوزه است [۴]. با توجه به اهمیت ژئوپلیتیکی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی خلیج‌فارس، هدف این مقاله، مرور نظام‌مند مطالعات موجود درباره ویژگی‌های آکوستیکی شمع‌کوبی، ارزیابی پتانسیل اثرگذاری آن بر جانوران دریایی و بررسی پیامدهای ناشی از آن بر سیمای صوتی محیط‌های دریایی است. تمرکز ویژه این پژوهش بر شرایط خاص خلیج‌فارس و شناسایی شکاف‌های موجود در تحقیقات این حوزه قرار دارد.

شواهد تجربی فزاینده‌ای نشان می‌دهد که آلودگی صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌تواند اثرات فیزیولوژیکی و رفتاری منفی متنوعی بر گونه‌های جانوری در سطوح انفرادی و اجتماعی بر جای گذارد و درنهایت بر بقا و موفقیت تولیدمثلی آن‌ها تأثیر بگذارد[۷,۸]. شمع‌کوبی به‌عنوان یکی از فعالیت‌های رایج در پروژه‌های مهندسی دریایی، نسبت به سایر منابع صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی بیشترین سهم را در ایجاد نوفه ضربه‌ای[۳] و طولانی‌مدت دارد. پتانسیل اثرگذاری اصوات ناشی از شمع‌کوبی بر آبزیان در مقیاس جهانی همچنان مورد توجه است[۹,۱۰] و می‌توانند رفتار، بقا، و ارتباطات صوتی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد[۱۱]. مطالعات جهانی همچنین نشان

داده‌اند که آلودگی صوتی ناشی از شمع‌کوبی قادر است سبب افزایش استرس فیزیولوژیک، کاهش کارایی بوم‌سازگان آکوستیکی[۴]، و اختلال در مسیریابی گونه‌های وابسته به صوت شود[۱۲,۱۳].

با این‌حال، در خلیج‌فارس ارزیابی‌های علمی و نظام‌مند درباره‌ی اثرات صوتی کوتاه‌مدت و بلندمدت ناشی از فعالیت‌های گسترده و مداوم شمع‌کوبی همچنان محدود، پراکنده و اغلب فاقد چارچوب استاندارد است. این در حالی است که در بسیاری از کشورهای پیشرو، دستورالعمل‌های مشخصی برای پایش آلودگی صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی، دسته‌بندی آن‌ها، مدل‌سازی انتشار صوت و به‌کارگیری راهکارهای کاهش آلودگی صوتی تدوین شده است[۱۶-۱۴].

در مطالعه‌ای، هالورسون و همکاران (۲۰۱۲ a)با توسعه‌ی یک روش نوین و استفاده از تجهیزات تخصصی (HICI-FT[5]) در شرایط کنترل‌شده‌ی آزمایشگاهی، اثرات اصوات با شدت بالای شمع‌کوبی را بر مرحله‌ی جوانی ماهی سالمون چینوک[۶] بررسی کردند.

مطالعات نشان داده‌اند که اصوات ناشی از فعالیت‌های شمع‌کوبی، ماهی‌هایی را که دارای کیسه‌ی شنای رشد یافته هستند بیش از گونه‌های فاقد کیسه‌ی شنا در معرض خطر ابتلا به آسیب فیزیکی باروتروما[۷] قرار می‌دهند. با توجه به شرایط جغرافیایی و زیست‌محیطی خلیج‌فارس ــ شامل آب گرم‌تر، عمق کم‌تر، ترکیب متفاوت بستر و تنوع گونه‌ای ــ احتمال می‌رود شدت و آستانه‌های آسیب ناشی از آلودگی صوتی در این منطقه متفاوت باشد. از این رو، انجام مطالعات اختصاصی بر گونه‌های بومی خلیج‌فارس ضروری به نظر می‌رسد [۴].

باوجود اهمیت موضوع، شکاف دانشی قابل‌توجهی در زمینه‌ی شناخت ویژگی‌های آکوستیکی شمع‌کوبی، الگوی انتشار آن در شرایط خاص خلیج‌فارس، و پیامدهای زیست‌محیطی آن مشاهده می‌شود. همچنین، عدم وجود یک مرور نظام‌مند از دانش موجود، نیاز به تبیین علمی ضرورت ارزیابی سیمای صوتی و جایگاه شمع‌کوبی به‌عنوان یک منبع اصلی اصوات ناشی از فعالیت‌های انسانی را بیش‌ازپیش برجسته می‌کند.

بر این اساس، هدف این مقاله مرور تحلیلی پژوهش‌های جهانی و منطقه‌ای مرتبط با آلودگی صوتی ناشی از فعالیت‌های شمع‌کوبی، تبیین پیامدهای آکوستیکی آن در خلیج‌فارس و تشریح ضرورت‌های مدیریتی برای ارزیابی و پایش سیمای صوتی است.

شمع‌کوبی به‌عنوان یک فرآیند مکانیکی، امواج صوتی با شدت بالا را در محیط‌های آبی منتشر می‌کند که قادر است موجب اختلال در رفتار، فیزیولوژی و حتی بقای گونه‌های حساس به صوت، از جمله پستانداران دریایی و ماهیان شود[۱۷]. این امواج نه‌تنها بر گونه‌های هدف اثر می‌گذارند، بلکه بر کل سیمای صوتی زیستگاه تأثیر داشته و تعادل زیست بومی را برهم می‌زنند. با توجه به نقش حیاتی ارتباطات صوتی در بوم سازهای دریایی، بررسی و پایش این امواج ضرورتی انکارناپذیر به شمار می‌رود.

در حال حاضر، ارزیابی سیمای صوتی به‌عنوان رویکردی نوین در پایش محیط‌زیست دریایی مطرح است. این رویکرد با تحلیل ترکیب و شدت اصوات طبیعی و اصوات ناشی از فعالیت های انسانی[۸]، امکان شناسایی تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی را فراهم می‌کند. در زمینه‌ی شمع‌کوبی، بهره‌گیری از این روش می‌تواند به درک دقیق‌تر دامنه و شدت اثرات صوتی کمک کرده و مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم سازد.

نبود داده‌های پایه‌ای، کمبود تجهیزات پایش صوتی و فقدان چارچوب‌های قانونی مشخص از جمله چالش‌های اصلی این حوزه به شمار می‌روند. این خلأ

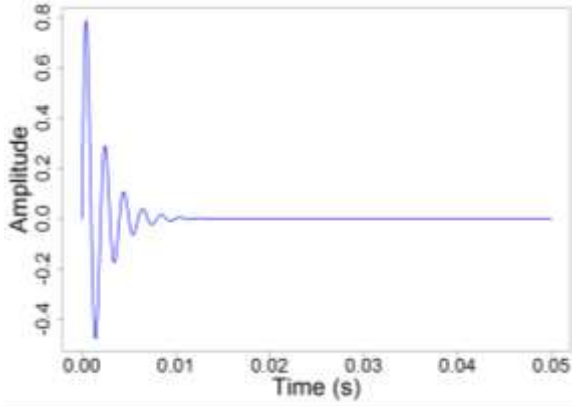
پژوهشی، ضرورت توجه جدی‌تر به ارزیابی‌های آکوستیکی در پروژه‌های توسعه‌ای را دوچندان می‌کند. هدف اصلی این مقاله این است که با تبیین پیامدهای آکوستیکی شمع‌کوبی و معرفی روش‌های پایش و تحلیل صوت، زمینه‌ای برای توسعه‌ی چارچوب‌های جامع‌تر در ارزیابی‌های زیست‌محیطی فراهم شود.

۲. الگوی منبع صوتی شمع‌کوبی

شمع‌کوبی ضربه‌ای روشی است که برای نصب شمع‌ها در پروژه‌های ساخت‌وساز دریایی و آب‌های داخلی با استفاده از چکش‌های ضربه‌ای پرانرژی به کار می‌رود. نصب شمع‌های فولادی توخالی به این شیوه می‌تواند سطح بسیار بالایی از امواج صوتی را در آب‌های اطراف، و حتی در هوا، ایجاد کند[۱۸]. با توجه به توسعه‌ی گسترده‌ی مزارع بادی فراساحلی در آب‌های اروپا و برنامه‌ریزی برای اجرای چنین پروژه‌هایی در ایالات متحده، همراه با نیاز روزافزون به نوسازی زیرساخت‌های دریایی، نگرانی‌های فزاینده‌ای درباره‌ی اثرات احتمالی امواج صوتی زیرآب ناشی از ساخت‌وساز بر جمعیت پستانداران دریایی و ماهیان مطرح شده است.

چکش‌های ضربه‌ای (مطابق شکل ۱) باید توانایی نصب شمع‌هایی با قطر حدود ۰/۵ تا ۶/۵ متر را داشته باشند؛ به‌طوری‌که با افزایش قطر شمع، میزان انرژی موردنیاز چکش نیز افزایش می‌یابد. مطالعات مشاهده‌ای در مقیاس کامل[۱۹-۲۰] و همچنین مطالعات عددی دقیق[۲۱] نشان داده‌اند که حدود ۰/۵٪ از انرژی ضربه‌ای این چکش‌ها به انرژی صوتی تبدیل شده و در نهایت وارد ستون آب می‌شود.

نمونه‌هایی از سطح فشار صوتی اوج در زیرآب ناشی از شمع‌کوبی ضربه‌ای نشان می‌دهد که در فاصله‌ی تقریبی ۱۰ متری از شمع‌هایی با قطر ۰/۷۵ متر، مقادیر حدود ۲۲۰ دسی‌بل نسبت به فشار مرجع ۱



شکل ۱. تصویر اوسیلوگرام حاصل از یک ضربه شمع‌کوبی. متمایل شدن دامنه موج به سمت عدد ۱ نشان دهنده بیشترین دامنه نوسان می‌باشد و نزدیک عدد ۰ کم‌ترین دامنه نوسان است. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تولیدشده است.

میکروپاسکال ثبت شده است[۲۰]. همچنین، در فاصله‌ی ۳۰۰ متری از شمع‌هایی با قطر ۵ متر، سطح فشار صوتی حدود ۲۰۰ دسی‌بل گزارش شده است [۲۲]. این امواج ضربه‌ای قوی می‌توانند اثرات فیزیولوژیک بالقوه‌ای بر ماهیان و پستانداران دریایی داشته باشند [۱۳-۱۲,۱۷,۲۵-۲۳,۲۶,۲۷]. در فواصل دورتر از منبع یا در ترازهای فشار صوت کم‌تر، اثرات احتمالی شامل پوشش اصوات زیستی مهم و یا تغییر در رفتار گونه‌هاست[۱۶,۲۷]. از این‌رو، پایش زیست‌محیطی و اجرای اقدامات کاهش اصوات ناشی از فعالیت‌های انسانی همواره به‌ویژه در زیستگاه‌های زیرآبی حساس ضروری است.

الگوی منبع صوتی شمع‌کوبی معمولاً ضربه‌ای و پالسی است؛ به‌گونه‌ای که هر ضربه ناشی از برخورد چکش با شمع، موجی صوتی با شدت بالا و مدت‌زمان کوتاه ایجاد می‌کند[۱۲]. این امواج به‌صورت تکرارشونده در فواصل زمانی منظم منتشر شده و دارای مؤلفه‌های فرکانسی گسترده‌ای هستند که از

فروصوت تا محدوده‌های بالاتر (تا ۱۰۰۰ هرتز) را در بر می‌گیرند[۲]. شدت صوت تولیدشده می‌تواند به بیش از ۱۹۰ دسی‌بل نسبت به فشار مرجع ۱ میکروپاسکال در فشار صوتی پیک برسد؛ سطحی که برای بسیاری از گونه‌های دریایی به‌عنوان آستانه‌ی آسیب‌پذیری محسوب می‌شود[۲۴,۲۷-۲۵].

به لحاظ آکوستیکی، منبع صوتی شمع‌کوبی را می‌توان یک منبع جهت‌دار دانست که انرژی صوتی را عمدتاً در راستای محور شمع و به سمت بستر دریا منتقل می‌کند. با این حال، به دلیل بازتاب‌ها و شکست‌های صوتی در لایه‌های مختلف آب و بستر، انتشار صوت می‌تواند در جهات گوناگون گسترش یابد. مدل‌سازی دقیق این الگو نیازمند در نظر گرفتن پارامترهایی همچون نوع شمع، عمق آب، جنس بستر و شرایط دمایی و شوری آب است؛ عواملی که همگی بر دامنه و مسیر انتشار صوت تأثیرگذارند.

۳. گستره جغرافیایی مناطق شمع‌کوبی در خلیج‌فارس

فعالیت‌های شمع‌کوبی در خلیج‌فارس عمدتاً در مناطق ساحلی و فراساحلی ایران، امارات متحده عربی، قطر و عربستان سعودی متمرکز هستند (شکل ۵). در ایران، این فعالیت‌ها به‌ویژه در پروژه‌های توسعه‌ی اسکله‌ها، پایانه‌های صادراتی و تأسیسات نفت و گاز در بنادری مانند بندرعباس، بوشهر، عسلویه و بندر امام خمینی مشاهده می‌شوند [۲۸]. در بخش فراساحلی نیز میدان‌های نفتی پارس جنوبی، سروش، فروزان و نوروز از جمله نقاط کلیدی به شمار می‌روند که ساخت سکوهای دریایی در آن‌ها نیازمند شمع‌کوبی گسترده است[۲۹].

وسعت جغرافیایی فعالیت‌های شمع‌کوبی در ایران به بیش از ۲۰۰ کیلومتر از خط ساحلی و ده‌ها کیلومترمربع از مناطق دریایی گسترش می‌یابد. عمق آب در این نواحی بین ۵ تا ۷۰ متر متغیر است و نوع بستر دریا ــ اعم از ماسه‌ای، گلی یا سنگی ــ در انتخاب روش شمع‌کوبی و شدت صوت تولیدشده نقش تعیین‌کننده دارد[۳۰-۳۱]. در کشورهای جنوبی خلیج‌فارس نیز پروژه‌های مشابهی در بنادر صنعتی همچون جبل‌علی، رأس‌لفان و الفجیره در حال اجراست که به‌طور مستقیم بر سیمای صوتی منطقه اثرگذارند.

پژوهش‌های متعددی در بخش‌های ایرانی خلیج‌فارس به بررسی و توصیف شیوه‌های شمع‌کوبی پرداخته‌اند[۳۱,۳۳]. در مطالعه‌ای، فخاریان و حسین زاده (۲۰۱۱) شمع‌کوبی در ماسه‌های کالکرئوس خلیج‌فارس را گزارش کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار شمع‌های کوبیده‌شده در ماسه‌های کالکرئوس به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر خردشدگی دانه‌ها و تغییرات خواص مکانیکی بستر قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که این ویژگی‌ها موجب کاهش بازدهی نفوذ شمع و تغییر الگوی انتقال انرژی ضربه در حین شمع‌کوبی می‌شوند. با این حال، بررسی و ارزیابی اثرات ناشی از استقرار و تولید اصوات این فعالیت انسانی بر آبزیان در خلیج‌فارس همچنان ناشناخته باقی مانده است[۴].

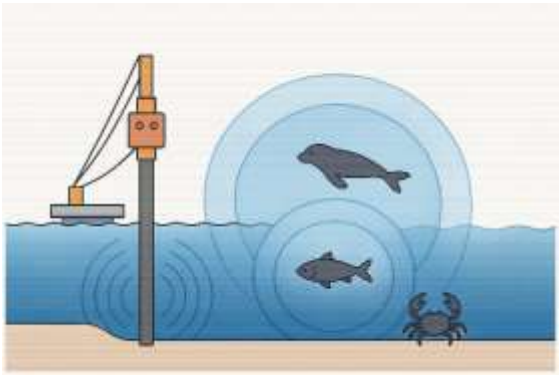
با توجه به تراکم بالای فعالیت‌های صنعتی و عمرانی در خلیج‌فارس، انتشار صوتی ناشی از شمع‌کوبی می‌تواند اثرات تجمیعی و گسترده‌ای بر زیستگاه‌های دریایی برجای گذارد (شکل ۲). مطالعات نشان داده‌اند که امواج ضربه‌ای شدید قادرند موجب تغییر رفتار، مهاجرت و حتی آسیب‌های فیزیولوژیک در گونه‌هایی مانند دلفین‌ها، نهنگ‌ها و ماهیان حساس به صوت شوند[۲۶-۱۷,۲۷]. این مسئله به‌ویژه در مناطق کم‌عمق و نزدیک به ساحل که محل تغذیه و زادآوری بسیاری از گونه‌هاست اهمیت بیشتری پیدا می‌کند[۳۳].

با وجود این تهدیدات، ارزیابی صوتی در پروژه‌های شمع‌کوبی خلیج‌فارس همچنان به‌صورت نظام‌مند و

استاندارد انجام نمی‌شود[۴]. نبود چارچوب‌های قانونی الزام‌آور، کمبود تجهیزات پایش صوتی و فقدان داده‌های پایه‌ای از جمله چالش‌های اصلی این حوزه به شمار می‌روند. پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که بهره‌گیری از روش‌های پایش سیمای صوتی و مدل‌سازی انتشار صوت می‌تواند به درک دقیق‌تر اثرات صوتی و تدوین راهکارهای مؤثر برای کاهش آن کمک کند[۱۶].

۴. پتانسیل اثرگذاری بر زیست‌مندان دریایی

زیست‌مندان دریایی برای انجام فعالیت‌های حیاتی خود به سامانه‌های شنوایی و خط جانبی وابسته‌اند [۳۴]. بسیاری از گونه‌های ماهی از صوت برای شناسایی طعمه، گریز از شکارچی و برقراری ارتباط اجتماعی استفاده می‌کنند[۱۱,۳۵]. نوفه شدید ناشی از شمع‌کوبی می‌تواند این کارکردها را مختل کند (شکل ۲)؛ به‌ویژه از طریق پدیده‌ای مانند «پوشانش صوتی[۹]» که مانع دریافت سیگنال‌های زیستی می‌شود[۳۶]. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض چنین نوفه‌ای ممکن است به آسیب فیزیولوژیک در اندام‌های شنوایی یا حتی مرگ بینجامد[۳۷-۳۸,۲۵-۲,۲۴]. افزون بر این، اثرات غیرمستقیم نیز اهمیت زیادی دارند.



شکل ۲. مدل شماتیک تأثیر امواج صوتی شمع‌کوبی بر طیف جانوران دریایی شامل بی‌مهرگان ماهی‌ها و پستانداران دریایی. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تولیدشده است.

افزایش تراز نوفه پس زمینه[۱۰] در محیط‌های ساحلی می‌تواند الگوهای رفتاری گونه‌های دریایی را تغییر دهد (شکل ۳)؛ از جمله ترک زیستگاه، کاهش فعالیت تغذیه و تولیدمثل، یا حتی تغییر مسیرهای مهاجرت[۱۱,۳۹]. در مناطق حساس مانند خلیج‌فارس، که تنوع زیستی بالاست اما حجم آب و ظرفیت تبادل صوتی محدود است، این تغییرات ممکن است پیامدهای زیست بومی گسترده‌ای به همراه داشته باشد[۴]. افزون بر این، رسوب‌زایی و ارتعاشات مکانیکی ناشی از شمع‌کوبی می‌تواند بسترهای مرجانی و زیستگاه‌های کفزی را نیز تخریب کند.

شکل ۳. مدل مفهومی پیامدهای جمعیتی اختلال صوتی (PCAD[11]) چندین مرحله را توصیف می‌کند که برای ارتباط دادن اختلال صوتی به اثرات بر جمعیت پستانداران دریایی ضروری است. (با اندکی تغییر برگرفته از [۴۰]).

از این رو، شناسایی و ارزیابی سیمای صوتی ناشی از عملیات شمع‌کوبی در خلیج‌فارس، گامی اساسی در مدیریت پایدار محیط‌های ساحلی و توسعه‌ی سازه‌های فراساحلی به شمار می‌رود. این ارزیابی نه‌تنها امکان تعیین نواحی با ریسک صوتی بالا را فراهم می‌سازد، بلکه مبنایی برای طراحی راهکارهای کاهش اثرات نوفه نیز ایجاد می‌کند؛ راهکارهایی همچون استفاده از حائل‌های حبابی، زمان‌بندی عملیات بر اساس فصل حضور گونه‌های حساس، و تدوین دستورالعمل‌های زیست‌صوتی بومی[۴۰] می‌تواند تعادلی میان توسعه‌ی صنعتی و حفاظت از زیست‌مندان ارزشمند دریایی خلیج‌فارس برقرار کند[۴۱].

خلیج‌فارس با تنوع زیستی بالای خود، یکی از مهم‌ترین مناطق ساحلی ایران به شمار می‌رود و گونه‌های متعددی از ماهیان، پستانداران دریایی و بی‌مهرگان، به‌ویژه در نواحی نزدیک به سواحل و زیستگاه‌های غذایی و تولیدمثلی، حضور دارند [۴]. افزایش فعالیت‌های صنعتی و فراساحلی ـ به‌ویژه عملیات شمع‌کوبی برای نصب سکوهای نفت، گاز و اسکله‌ها ـ سبب تولید اصوات شدید و مداوم در این اکوسیستم حساس شده است. این اصوات می‌توانند فعالیت‌های حیاتی زیست‌مندان دریایی را مختل کنند؛ از جمله تغییر مسیر مهاجرت، کاهش فعالیت تغذیه و تولیدمثل، ایجاد استرس فیزیولوژیک، و در موارد شدید، آسیب به سامانه‌ی شنوایی یا حتی مرگ [۱۱].

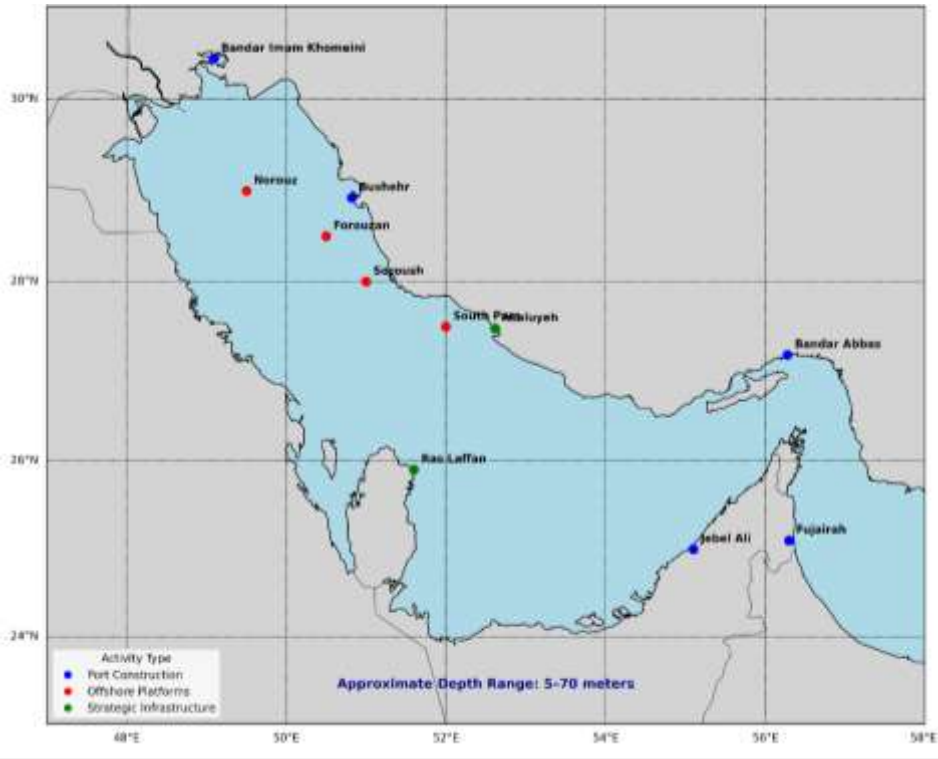
برای بررسی اثرات آلودگی‌های صوتی ناشی از شمع‌کوبی، لازم است گونه‌های هدف در خلیج‌فارس بر اساس معیارهایی چون حساسیت صوتی، اهمیت اقتصادی و زیست بومی، و امکان دسترسی میدانی انتخاب شوند. مطالعات پیشین در ایران در زمینه‌ی رفتارشناسی آبزیان و ارزیابی اثرات صوت نشان داده‌اند که انجام آزمایش‌های پژوهشی در محیط‌های کنترل‌شده‌ی آزمایشگاهی امکان‌پذیر و موفقیت‌آمیز بوده است[۴۲].

با وجود توسعه‌ی گسترده‌ی پروژه‌های عمرانی فراساحلی در خلیج‌فارس ـ از جمله ساخت اسکله‌ها، سکوهای نفتی و زیرساخت‌های بندری که به‌طور عمده بر شمع‌کوبی متکی هستند ـ بخش قابل توجهی از مطالعات انجام‌شده در این منطقه ماهیتی ژئوتکنیکی و سازه‌ای داشته و بیشتر بر ظرفیت باربری، رفتار مکانیکی شمع‌ها و ویژگی‌های رسوبات بستر تمرکز کرده‌اند[۲۸-۳۱]. در مقابل، بررسی‌های آکوستیکی مستقیم از اصوات ناشی از شمع‌کوبی ـ شامل اندازه‌گیری میدانی سطح فشار صوت، ویژگی‌های زمانی-طیفی اصوات ضربه‌ای و الگوی انتشار آن‌ها در محیط‌های کم‌عمق خلیج‌فارس ـ به‌طور محسوسی محدود است. این عدم توازن پژوهشی سبب شده است که سهم واقعی شمع‌کوبی در شکل‌دهی به سیمای صوتی خلیج‌فارس و شدت مواجهه‌ی زیستی آبزیان با این منبع صوتی، به‌صورت کمی و مبتنی بر داده‌های محلی، به‌روشنی مشخص نباشد. از سوی دیگر، هرچند مطالعات بین‌المللی متعددی ویژگی‌های آکوستیکی شمع‌کوبی ـ از جمله اوج فشار صوت (Peak SPL، تراز مواجهه با صوت (SEL^{12}) و ماهیت ضربه‌ای این منبع ـ را در محیط‌های دریایی مختلف گزارش کرده‌اند [۴۳-۴۵].

شکل ۴. مدل شماتیک دسته‌بندی انواع استرس‌ها ناشی از فعالیت‌های انسانی بر آبزیان دریایی. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تولیدشده است. تصویرنمایش مفهومی است و داده تجربی را نشان نمی دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های صوتی مناطق شمع‌کوبی در خلیج‌فارس. جدول با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ و با تحلیل منابع ابراهیمیان و شمشیرگران (2023، 2021)، مطالعات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی منطقه‌ای تولید شده است.

منطقه	نوع فعالیت	عمق تقریبی (متر)	نوع بستر	تراز فشار صوت تخمینی(dB re 1 µPa) در فاصله ۱ متر از منبع	حساسیت زیستی منطقه
بندرعباس	ساخت اسکله	۱۰–۲۵	ماسه‌ای–گلی	۱۷۰–۱۸۵	متوسط تا بالا
پارس جنوبی	سکوهای نفتی	۴۰–۷۰	گلی–سنگی	۱۸۵–۱۹۵	بسیار بالا
بوشهر	توسعه بندر	۵–۲۰	ماسه‌ای	۱۶۵–۱۸۰	متوسط
سروش	سکوهای فراساحلی	۳۰–۶۰	گلی	۱۸۰–۱۹۰	بالا
جبل‌علی (امارات)	بندر صنعتی	۱۵–۳۵	ماسه‌ای	۱۷۰–۱۸۵	متوسط
رأس‌لفان (قطر)	تأسیسات گازی	۲۵–۵۰	گلی–سنگی	۱۸۰–۱۹۰	بالا



شکل ۵. مناطق شمع‌کوبی در خلیج‌فارس شامل شهرهای ساحلی ایران بندرعباس، بوشهر، عسلویه، بندر امام خمینی. میدان‌های نفتی فراساحلی پارس جنوبی، سروش، نوروز، فروزان. بنادر صنعتی کشورهای همسایه جبل‌علی (امارات)، رأس‌لفان (قطر)، فجیره (امارات). تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تولیدشده است.

جدول ۲. مرور داده‌های اثر شمع‌کوبی بر گونه‌های جانوران دریایی. اعداد توسط نویسندگان از منابع علمی گرداوری شده اند.

گونه / گروه	منبع صوت	تراز فشار صوت(SPL)	فاصله اثر*	نوع واکنش	منبع علمی
Sole ماهیان کف‌زی	شمع‌کوبی با چکش هیدرولیک	۱۴۰–۱۵۶ dB re 1 µPa (Peak)	۰–۱km	تغییر سرعت شنا و جهت‌گیری [۴۵]	Mueller-Blenkle et al., 2010
Cod ماهیان استخوانی	شمع‌کوبی	۱۴۰–۱۶۱ dB re 1 µPa	۰/۲–۱km	تغییر رفتار، اجتناب از منبع[۴۵]	Mueller-Blenkle et al., 2010
Sheepshead / Grey Snapper	شمع‌کوبی	۱۵۲–۱۵۷ dB re 1 µPa	چند صد متر تا ۱km	تغییر رفتار، کاهش فعالیت تغذیه[۴۶]	Iafrate et al., 2016
Zooplankton	شمع‌کوبی	۲۰۲–۲۲۰ dB re 1 µPa	۰/۲–۱km	کاهش تراکم و مرگ و میر[۴۳]	McCauley et al., 2017
Harbor porpoise	شمع‌کوبی	۱۲۵–۱۴۳ dB re 1µPa²s	۲–۷km	کاهش کارایی شکار، اجتناب از منطقه[۴۷]	Kastelein et al., 2018
Longfin squid	شمع‌کوبی	بیش از ۱۸۰ dB re 1 µPa	چند کیلومتر	تغییر رفتار تغذیه و مهاجرت[۴۸]	Jones et al., 2021
Harbor porpoise	شمع‌کوبی + پرده حباب بزرگ	کاهش تا ۹۰٪	۰–۵km	کاهش واکنش منفی[۴۴]	Lucke et al., 2011
Various fish species	شمع‌کوبی	تا ۲۲۰ dB re 1 µPa	۰–۲km	اجتناب، اختلال در تغذیه، آسیب شنوایی[۲]	Dahl et al., 2015
* منظور از فاصله اثر همان دامنه‌ی واکنش جانداران به موج آکوستیکی است.					

۵. نتیجه‌گیری

سیمای صوتی دریایی، به‌عنوان برآیند زیست صوت[۱۳]، زمین صوت[۱۴] و انسان صوت[۱۵]، نقشی مهم در عملکردهای بوم‌شناختی، ارتباطات درون‌گونه‌ای و رفتار آبزیان ایفا می‌کند. برای کاهش اثرات مخرب آلودگی صوتی ناشی از شمع‌کوبی، می‌توان از روش‌هایی چون محدود کردن ساعات کار (روزهای هفته و ساعات روز)، پایش صوتی مداوم، به‌کارگیری دستگاه‌های بازدارنده‌ی صوتی با توجه به آستانه‌ی شنوایی گونه‌های بومی یا مهاجر، کاهش مقاومت بستر از طریق تغییرات مهندسی، و استفاده از فناوری‌های جایگزین مانند شمع‌کوبی بدون ضربه یا سامانه‌های هیدرولیکی که شدت صوت را کاهش می‌دهند، بهره گرفت.

به‌کارگیری موانع صوتی، از جمله حباب‌سازها یا موانع جامد در اطراف محل شمع‌کوبی، می‌تواند به کاهش شدت صوت کمک کند. در خلیج‌فارس، که پروژه‌های زیرساختی دریایی و سازه‌های ساحلی در حال توسعه‌اند، مطالعه‌ی اثرات آلودگی صوتی ناشی از شمع‌کوبی به‌ویژه در زیستگاه‌های حساس ضروری است. ثبت بلندمدت سیمای صوتی، ارزیابی اثرات نوفه بر گونه‌های کلیدی، و در نهایت مدل‌سازی الگوهای پراکنش[۱۶] صوت و راهکارهای کاهش آن، از اقدامات پیشنهادی به شمار می‌روند. افزون بر این، با توجه به شرایط محیطی خاص و حضور گونه‌های بومی و مهاجر، ممکن است تدوین استانداردهای ویژه‌ی مدیریت صوتی ضرورت یابد؛ استانداردهایی که باید در مستندات بین‌المللی و منطقه‌ای لحاظ شوند. این اولویت‌های پژوهشی می‌توانند به‌طور مستقیم در شکل‌دهی به سیاست‌گذاری‌های پایدار توسعه‌ی ساحلی خلیج‌فارس، در هر دو سطح ملی و بین‌المللی، نقش‌آفرین باشند.

۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان از نظرات مفید و ارزشمند سردبیر و داوران محترم که موجب بهبود کیفیت مقاله شد، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

۷. منابع

1. McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., & 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*, *120*(2), 711-718. https://doi.org/10.1121/1.2216565
2. Dahl, P. H., de Jong, C. A., & Popper, A. N. (2015). The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life. *Acoustics Today*, *11*(2), 18-25.
3. Owfi, F., Braulik, G. T., & Rabbaniha, M. (2016). Review Papers: Species diversity and distribution pattern of marine mammals of the Persian Gulf and Gulf of Oman-Iranian Waters. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, *15*(2), 927-944.
4. Shafiei Sabet, S. (2018). The impacts of anthropogenic sound on marine mammals in the Persian Gulf; current status and need for future research. *Journal of the Persian Gulf*, *9*(32), 1-10.
5. Arjmandzadeh, A., & Khalilabadi, M. R. (2022). Investigation of the acoustic field produced by the bottlenose dolphin. *Proceedings of the 2nd National Conference on Sustainable Development of the Persian Gulf*: Environment and Coastal Areas.

6. Khalilabadi, M. R. (2023). Underwater ship-radiated acoustic noise recognition based on mel-spectrogram and convolutional neural network. *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering (ijcoe)*, *8*(1), 10-15. https://doi.org/10.22034/ijcoe.2023.166732

7. Kight, C. R., & Swaddle, J. P. (2011). How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecology letters*, *14*(10), 1052-1061. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01664.x

8. Kunc, H. P., McLaughlin, K. E., & Schmidt, R. (2016). Aquatic noise pollution: implications for individuals, populations, and ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *283*(1836), 20160839. https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0839

9. Popper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of human-generated sound on fish. *Integrative Zoology*, *4*(1), 43-52. https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2008.00134.x

10. Herbert-Read, J. E., Kremer, L., Bruintjes, R., Radford, A. N., & Ioannou, C. C. (2017). Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *284*(1863), 20171627. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1627

11. Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. (2010). A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in ecology & evolution*, *25*(7), 419-427. http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005

12. Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Carlson, T. J., Woodley, C. M., & Popper, A. N. (2012a). Assessment of barotrauma injury and cumulative sound exposure level in salmon after exposure to impulsive sound. In *The effects of noise on aquatic life* (pp. 235-237). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7311-5_52

13. Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Woodley, C. M., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2012b). Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS One*, *7*(6), e38968. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038968

14. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2005). Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining When Noise Causes Biologically Significant Effects. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/9648.

15. Lucke, K., & Siemensma, M. (2013). International regulations on the impact of pile driving noise on marine mammals-A literature review.

16. Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., & Tavolga, W. N. (2014). *ASA S3/SC1. 4 TR-2014 sound exposure guidelines for fishes and sea turtles: a technical report prepared by ANSI-accredited standards committee S3/SC1 and registered with ANSI*. Springer. ISBN: 9783319066592, 3319066595

17. Kastelein, R. A., Gransier, R., Marijt, M. A., & Hoek, L. (2015). Hearing frequency thresholds of harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) temporarily affected by played back offshore pile driving sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *137*(2), 556-564. https://doi.org/10.1121/1.4906261

18. Lepper, P. A., Robinson, S. P., Ainslie, M. A., Theobald, P. D., & de Jong, C. A. (2012). Assessment of cumulative sound exposure levels for marine piling events. In *The Effects of Noise*

on Aquatic Life (pp. 453-457). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7311-5_102

19. Robinson, S. P., Theobald, P. D., & Lepper, P. A. (2012, July). Underwater noise generated from marine piling. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 17, No. 1, p. 070080). Acoustical Society of America. https://doi.org/10.1121/1.4790330
20. Dahl, P. H., & Reinhall, P. G. (2013). Beam forming of the underwater sound field from impact pile driving. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *134*(1), EL1-EL6. https://doi.org/10.1121/1.4807430
21. Zampolli, M., Nijhof, M. J., de Jong, C. A., Ainslie, M. A., Jansen, E. H., & Quesson, B. A. (2013). Validation of finite element computations for the quantitative prediction of underwater noise from impact pile driving. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *133*(1), 72-81. https://doi.org/10.1121/1.4768886
22. Lippert, T., & von Estorff, O. (2014). The significance of parameter uncertainties for the prediction of offshore pile driving noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *136*(5), 2463-2471. https://doi.org/10.1121/1.4896458
23. Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Matthews, F., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2012). Effects of exposure to pile-driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia and hogchoker. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *279*(1748), 4705-4714. https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1544
24. Casper, B. M., Smith, M. E., Halvorsen, M. B., Sun, H., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2013a). Effects of exposure to pile driving sounds on fish inner ear tissues. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, *166*(2), 352-360. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.07.008
25. Casper, B. M., Halvorsen, M. B., Matthews, F., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2013b). Recovery of barotrauma injuries resulting from exposure to pile driving sound in two sizes of hybrid striped bass. *PloS one*, *8*(9), e73844. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073844
26. Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P. A., & 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), 4060-4070. https://doi.org/10.1121/1.3117443
27. Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., & Tyack, P. L. (2007). Structure of the noise exposure criteria. *Aquatic mammals*, *33*(4), 427.
28. Shamshirgaran, A., & Ebrahimian, B. (2021). Evaluation of Compressive Bearing Capacity of Long Offshore Steel Piles Driven in the Persian Gulf. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(9), 4029-4060. https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18158.6795
29. Shamshirgaran, A. H., & Ebrahimian, B. (2023). Bearing Capacity Analysis of Offshore Piles in the Persian Gulf using CPT Results and Time Effect Consideration. *Journal of Transportation Research*, *20*(3), 297-326. https://doi.org/10.22034/tri.2021.284453.2904

30. Rostami, M., Khademalrasoul, A., & Valipour, A. (2026). Application of Acoustic Emission for Diagnostic pile penetration by consideration of soil particle breakage. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, *12*(1), 60-73. https://doi.org/10.22055/jacm.2025.47278.4687

31. Fakharian, K., & Hosseinzadeh, A. I. (2011). Pile driving experiences in Persian Gulf calcareous sands. *Frontiers in Offshore Geotechnics II*.

32. Bayat Tork, M. M., Zad, A. A., & E brahimian, B. (2025). Bearing capacity assessment of driven piles at Southern Iran: A statistical and machine learning approach. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-33. https://doi.org/10.1080/1064119X.2025.2592079

33. Sarin, A., Jarriel, S., Jezequel, Y., Cones, S., & Mooney, T. A. (2025). Pile driving noise hinders growth in marine bivalve. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *158*(4_Supplement), A98-A98. https://doi.org/10.1121/10.0040254

34. Popper, A. N., & Higgs, D. M. (2009). Fish: hearing, lateral lines (Mechanisms, role in behavior, adaptations to life underwater). *Marine Biology*, 372. ISBN: 9780123757241, 012375724X

35. Myrberg Jr, A. A. (1997). Underwater sound: its relevance to behavioral functions among fishes and marine mammals. *Marine & Freshwater Behaviour & Phy*, *29*(1-4), 3-21. https://doi.org/10.1080/10236249709378998

36. Mooney, T. A., Jarriel, S., Nieder, C., Macapia, A., Jezequel, Y., Formel, N., & Collins, J. A. (2025). Say what? Pile driving noise alters hearing abilities, respiration rates, and behaviour in summer flounder (*Paralichthys dentatus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, *158*(4_Supplement), A424-A424. https://doi.org/10.1121/10.0041375

37. Roberts, L., Harding, H. R., Voellmy, I., Bruintjes, R., Simpson, S. D., Radford, A. N., & Elliott, M. (2016). Exposure of benthic invertebrates to sediment vibration: from laboratory experiments to outdoor simulated pile-driving. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 27, No. 1, p. 010029). Acoustical Society of America. https://doi.org/10.1121/2.0000324

38. van der Knaap, I., Slabbekoorn, H., Moens, T., Van den Eynde, D., & Reubens, J. (2022). Effects of pile driving sound on local movement of free-ranging Atlantic cod in the Belgian North Sea. *Environmental Pollution*, *300*, 118913. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118913

39. Cones, S. F., Jézéquel, Y., Ferguson, S., Aoki, N., & Mooney, T. A. (2022). Pile driving noise induces transient gait disruptions in the longfin squid (*Doryteuthis pealeii*). *Frontiers in Marine Science*, *9*, 1070290. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1070290

40. National Research Council. 2005. How to Get From Acoustic Disturbance to Population Effects." Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining When Noise Causes Biologically Significant Effects. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/11147.

41. Popper, A. N., Hice-Dunton, L., Jenkins, E., Higgs, D. M., Krebs, J., Mooney, A., & Williams, K. A. (2022). Offshore wind energy development: research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *151*(1), 205-215. https://doi.org/10.1121/10.0009237

42. Shafiei Sabet, S. (2024). Experimental sound exposure studies on aquatic animals: An early attempt to develop underwater bioacoustics in Iran. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *156*(4_Supplement), A84-A84. https://doi.org/10.1121/10.0035189

43. McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R. A., & Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature ecology & evolution*, *1*(7), 0195. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0195

44. Lucke, K., Lepper, P. A., Blanchet, M. A., & Siebert, U. (2011). The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, *130*(5), 3406-3412. https://doi.org/10.1121/1.3626123

45. Mueller-Blenkle, C., McGregor, P. K., Gill, A. B., Andersson, M. H., Metcalfe, J., Bendall, V., & Thomsen, F. (2010). Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish. ISBN 978-0-9561404-9-4

46. Iafrate, J. D., Watwood, S. L., Reyier, E. A., Scheidt, D. M., Dossot, G. A., & Crocker, S. E. (2016). Effects of pile driving on the residency and movement of tagged reef fish. *PLoS One*, *11*(11), e0163638. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163638

47. Kastelein, R. A., Van de Voorde, S., & Jennings, N. (2018). Swimming Speed of a Harbor Porpoise (*Phocoena phocoena*) During Playbacks of Offshore Pile Driving Sounds. *Aquatic Mammals*, *44*(1).

48. Jones, I. T., Peyla, J. F., Clark, H., Song, Z., Stanley, J. A., & Mooney, T. A. (2021). Changes in feeding behavior of longfin squid (*Doryteuthis pealeii*) during laboratory exposure to pile driving noise. *Marine Environmental Research*, *165*, 105250. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105250

پی‌نوشت

[1] Pile Driving
[2] Ecoacoustics
[3] Impulse Noise
[4] Acoustic Ecosystem
[5] High –Intensity Controlled Impedance-Fluid-Filled Wave Tube
[6] *Oncorhynchus tshawyscha*
[7] Barotrauma
[8] Anthropogenic Noise
[9] Audio Masking
[10] Background Noise level
[11] Population Consequences of Acoustic Disturbance
[12] Sound Exposure Level
[13] Biophony
[14] Geophony
[15] Anthropophony
[16] Scattering