

شمع کوبی و سیمای صوتی خلیج فارس: مرور پیامدهای آکوستیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی

سعید شفیعی ثابت*	مرضیه امینی فرد	زهره سمندر	فاطمه علیزاده لادمخی
استادیار، عضو هیات علمی گروه شیلات دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان	دانشجوی دکتری بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان	دانشجوی ارشد بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان	دانشجوی دکتری بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان
s.shafiei.sabet@guilan.ac.ir	aminifard@msc.guilan.ac.ir	Zahrasamandar@webmail.guilan.ac.ir	f.alizadeh@webmail.guilan.ac.ir

چکیده

فعالیت‌های انسانی در مناطق دریایی، به‌ویژه عملیات شمع کوبی و سایر فرایندهای صنعتی مرتبط با ساخت و بهره‌برداری پالایشگاه‌ها، موجب ایجاد منابع صوتی شدید زیرآبی می‌شوند که می‌توانند تأثیرات جدی بر زیستگاه‌های دریایی و گونه‌های آبی داشته باشند. عملیات شمع کوبی می‌تواند اصوات ضربه ای با تراز فشار صوتی بیش از $220 \mu\text{Pa}@1\text{m}$ تولید کند. نوفه تولیدشده ناشی از عملیات شمع کوبی می‌تواند موجب آسیب‌های فیزیکی، کاهش موقت یا دائمی توان شنوایی، و بروز پاسخ‌های اجتنابی رفتاری در جانداران دریایی شود. خلیج فارس 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 باهدف معرفی شمع کوبی به‌عنوان یک منبع صوتی عمده در خلیج فارس و بررسی پیامدهای آن بر پایداری اکوسیستم‌های دریایی، اهمیت انجام مطالعات سیستماتیک سیمای صوتی در آب‌های ایران، به‌ویژه خلیج فارس را مورد تأکید قرار می‌دهد. فقدان شناخت دقیق سیمای صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌تواند مانع از مدیریت مؤثر و حفاظت از گونه‌های حساس آبی 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: سعید شفیعی ثابت s.shafiei.sabet@guilan.ac.ir

۱. مقدمه

سیمای صوتی دریایی^۱

افزایش فعالیت‌های انسانی در محیط‌های دریایی طی دهه‌های اخیر موجب تغییر چشمگیر در ساختار طبیعی سیمای صوتی دریاها شده است (McDonald et al., 2006). 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، شمع کوبی^۲ به‌عنوان یکی از قدرتمندترین و تأثیرگذارترین منابع تولید امواج صوتی زیرآب و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل برهم زنده تعادل صوتی محیط‌های دریایی شناخته می‌شوند (Dahl et al., 2015). شمع کوبی برای ساخت سازه‌های ساحلی و فراساحلی انجام می‌شود و با تولید اصوات شدید و مکرر، می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر بوم صوتی^۳ و گونه‌های وابسته به صوت بر جای گذارد. اصوات تولیدشده توسط فعالیت‌های شمع کوبی معمولاً فشار صوتی زیاد، شیب شروع صوت بسیار تند، طیف وسیع فرکانسی و الگوی انتشار پیچیده دارند. این ویژگی‌ها سبب می‌شود شمع کوبی نه تنها یک چالش مهندسی، بلکه یک موضوع مهم زیست‌محیطی و آکوستیکی در مقیاس جهانی تلقی شود.

خلیج فارس 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 (Owfi et al., 2016). این پهنه آبی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد هیدرولوژیک، عمق کم، تبادل محدود آب و فعالیت‌های انسانی نظیر توسعه بنادر، ساخت سازه‌های ساحلی، حفاری، احداث سکوه‌های نفتی و پروژه‌های عمرانی فراساحلی، با افزایش بی‌سابقه منابع صوتی مواجه شده است. از این رو خلیج فارس یکی از حساس‌ترین مناطق دریایی جهان به شمار می‌رود که در برابر تغییرات سیمای صوتی آسیب پذیر است (Shafiei Sabet, 2018). مطالعات محدودی بر نحوه تجزیه تحلیل اصوات و میدان‌های آکوستیکی در منطقه خلیج فارس در ایران انجام شده است (Khalilabadi, 2023; Aliarjmandzadeh and Khalilabadi, 2022). باوجود اهمیت این منطقه و منابع صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی گسترده، دانش موجود درباره ویژگی‌های آکوستیکی شمع کوبی و نقش آن در شکل‌دهی سیمای صوتی خلیج فارس همچنان محدود و عمدتاً مربوط به مناطق سواحل کشورهای عربی این حوزه است (Shafiei Sabet, 2018). با توجه به اهمیت ژئوپلیتیکی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی خلیج فارس هدف این مقاله، مرور نظام‌مند مطالعات موجود درباره ویژگی‌های آکوستیکی شمع کوبی، ارزیابی پتانسیل اثرگذاری آن بر جانوران دریایی و بررسی پیامدهای ناشی از آن بر سیمای صوتی محیط‌های دریایی است. تمرکز ویژه‌ای این پژوهش بر شرایط خاص خلیج فارس 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 (Kight & Swaddle, 2011; Kunc et al., 2016).

¹ Marine Soundscape

² Pile Driving

³ Ecoacoustics

بر مرحله‌ی جوانی ماهی سالمون چینوک^۴ 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^۵ قرار می‌دهند. با توجه به شرایط جغرافیایی و زیست‌محیطی خلیج فارس – شامل آب گرم‌تر، عمق کم‌تر، ترکیب متفاوت بستر و تنوع گونه‌ای – احتمال می‌رود شدت و آستانه‌های آسیب ناشی از آلودگی صوتی در این منطقه متفاوت باشد. از این رو، انجام مطالعات اختصاصی بر گونه‌های بومی خلیج فارس ضروری به نظر می‌رسد (Shafiei Sabet, 2018).

باوجود اهمیت موضوع، شکاف دانشی قابل‌توجهی در زمینه‌ی شناخت ویژگی‌های آکوستیکی شمع‌کوبی، الگوی انتشار آن در شرایط خاص خلیج فارس، 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 خلیج فارس 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

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^۱ و طولانی‌مدت دارد. پتانسیل اثرگذاری اصوات ناشی از شمع‌کوبی بر آبزیان در مقیاس جهانی همچنان مورد توجه است (Popper and Hastings, 2009; Herbert-Read et al., 2017) می‌توانند رفتار، بقا، و ارتباطات صوتی آنها را تحت تاثیر قرار دهد (Slabbekoorn et al., 2010). مطالعات جهانی همچنین نشان داده‌اند که آلودگی صوتی ناشی از شمع‌کوبی قادر است سبب افزایش استرس فیزیولوژیک، کاهش کارایی بوم‌سازگان آکوستیکی^۲، و اختلال در مسیریابی گونه‌های وابسته به صوت شود (Halvorsen et al., 2012a, b).

با این حال، در خلیج فارس 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 (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2005; Lucke & Siemensma, 2013; Popper et al., 2014). در مطالعه‌ای، Halvorsen و همکاران (۲۰۱۲) (a) توسعه‌ی یک روش نوین و استفاده از تجهیزات تخصصی (HICI-FT³) در شرایط کنترل‌شده‌ی آزمایشگاهی، اثرات اصوات با شدت بالای شمع‌کوبی را

¹ Impulse noise

² acoustic ecosystem

³ High –intensity controlled impedance-fluid-filled wave tube

⁴ *Oncorhynchus tshawytscha*

⁵ Barotrauma

دریایی و ماهیان شود (Kastelein et al., 2015). این امواج نه تنها 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 به عنوان رویکردی نوین در پایش محیط زیست دریایی مطرح است. این رویکرد با تحلیل ترکیب و شدت اصوات طبیعی و اصوات ناشی از فعالیت های انسانی^۱، 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.

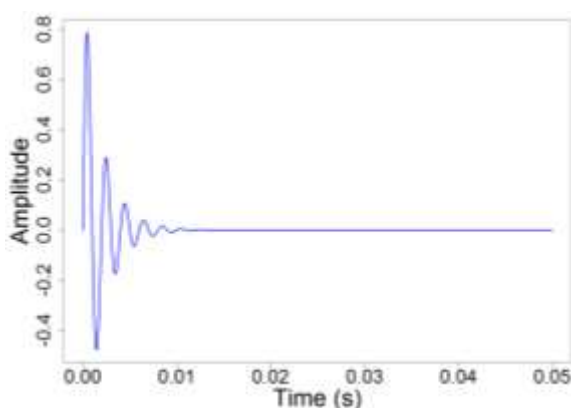
هدف اصلی این مقاله این است که با تبیین پیامدهای آکوستیکی شمع‌کوبی و معرفی روش‌های پایش و تحلیل صوت، زمینه‌ای برای توسعه‌ی چارچوب‌های جامع‌تر در ارزیابی‌های زیست‌محیطی فراهم شود.

۲. الگوی منبع صوتی شمع کوبی

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 (Lepper et al.,

2012). 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 (Robinson و همکاران، ۲۰۱۲؛ Dahl و Reinhall، ۲۰۱۳) و همچنین مطالعات عددی دقیق (Zampolli و همکاران، ۲۰۱۳) نشان داده‌اند که حدود ۰/۵٪ از انرژی ضربه‌ای این چکش‌ها به انرژی صوتی تبدیل شده و در نهایت وارد ستون آب می‌شود.



شکل ۱. موج صوتی اوسیلوگرام حاصل از یک ضربه شمع کوبی نمایش‌دهنده یک قله صوتی شدید و ناگهانی است که به دنبال آن افت سریع فشار صوتی رخ می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده زمان (ثانیه) و محور عمودی نشان‌دهنده دامنه موج (Amplitude) است. واحد محور عمودی دامنه موج بین ۱- تا ۱ می باشد که به صورت خطی نشان داده شده است. 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 (<https://chatgpt.com>).

¹ Anthropogenic noise

به لحاظ آکوستیکی، منبع صوتی شمع کوبی 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 شمع کوبی در

خلیج فارس

فعالیت‌های شمع‌کوبی در خلیج فارس 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 بنداری مانند بندرعباس، بوشهر، عسلویه و بندر امام خمینی مشاهده می‌شوند (Shamshirgaran & Ebrahimian, 2021). 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 (Shamshirgaran & Ebrahimian, 2023).

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 — اعم از ماسه‌ای، گلی یا سنگی — در انتخاب روش شمع‌کوبی و شدت صوت تولیدشده نقش تعیین‌کننده دارد (Rostami et al., 2026).

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 میکروپاسکال ثبت شده است (Dahl و Reinhall, ۲۰۱۳). همچنین، در فاصله‌ی ۳۰۰ متری از شمع‌هایی با قطر ۵ متر، سطح فشار صوتی حدود ۲۰۰ دسی‌بل گزارش شده است (Lippert و von Estorff, ۲۰۱۴). این امواج ضربه‌ای قوی می‌توانند اثرات فیزیولوژیک بالقوه‌ای بر ماهیان و پستانداران دریایی داشته باشند (Halvorsen et al., 2012a,b,c; Southall et al., 2007; Casper et al., 2013a,b; Lucke et al., 2009; Kastelein et al., 2015). در فواصل دورتر از منبع یا در ترازهای فشار صوت کمتر، اثرات احتمالی شامل پوشش اصوات زیستی مهم و یا تغییر در رفتار گونه‌هاست (Southall et al., 2007; Popper et al., 2014). از این رو، 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 (Halvorsen et al., 2012a). 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 (Dahl et al., 2015). 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 (Southall et al., 2007; Casper et al., 2013).

Hosseinzadeh, 2011). در کشورهای جنوبی خلیج فارس نیز پروژه‌های مشابهی در بنادر صنعتی همچون جبل علی، رأس لفان و الفجیره در حال اجراست که به طور مستقیم بر سیمای صوتی منطقه اثرگذارند.

پژوهش‌های متعددی در بخش‌های ایرانی خلیج فارس به بررسی و توصیف شیوه‌های شمع‌کوبی پرداخته‌اند (Rostami et al., 2026; Bayat Tork et al., 2025). در مطالعه‌ای، Fakharian و Hosseinzadeh (2011) شمع‌کوبی در ماسه‌های کالکروئوس خلیج فارس را گزارش کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار شمع‌های کوبیده شده در ماسه‌های کالکروئوس به طور معنی‌داری تحت تأثیر خردشدگی دانه‌ها و تغییرات خواص مکانیکی بستر قرار دارد؛ به گونه‌ای 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 خلیج فارس همچنان ناشناخته باقی مانده است (Shafiei Sabet, 2018).

با توجه به تراکم بالای فعالیت‌های صنعتی و عمرانی در خلیج فارس، 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 (Southall et al., 2007; Lucke et al., 2009; Kastelein et al., 2015). این مسئله به ویژه در مناطق کم عمق و نزدیک به ساحل — که محل تغذیه و زادآوری بسیاری از گونه‌هاست — اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Sarin et al., 2025).

با وجود این تهدیدات، ارزیابی صوتی در پروژه‌های شمع‌کوبی خلیج فارس همچنان به صورت نظام‌مند و

استاندارد انجام نمی‌شود (Shafiei Sabet, 2018). 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 (Popper et al., 2014).

۴. پتانسیل اثرگذاری بر زیست‌مندان دریایی

زیست‌مندان دریایی برای انجام فعالیت‌های حیاتی خود به سامانه‌های شنوایی و خط جانبی وابسته‌اند (Popper and Higgs, 2009). بسیاری از گونه‌های ماهی از صوت برای شناسایی طعمه، گریز از شکارچی و برقراری ارتباط اجتماعی استفاده می‌کنند (Myrberg, 1997; Slabbekoorn et al., 2010). نوفه شدید ناشی از شمع‌کوبی می‌تواند این کارکردها را مختل کند؛ به ویژه از طریق پدیده‌ای مانند «پوشانش صوتی»^۱ که مانع دریافت سیگنال‌های زیستی می‌شود (Mooney et al., 2025). قرار گرفتن طولانی مدت در معرض چنین نوفه‌ای ممکن است به آسیب فیزیولوژیک در اندام‌های شنوایی یا حتی مرگ بینجامد (Casper et al., 2013; Roberts et al., 2016; Dahl et al., 2015; van der Knaap et al., 2022). افزون بر این، اثرات غیرمستقیم نیز اهمیت زیادی دارند.

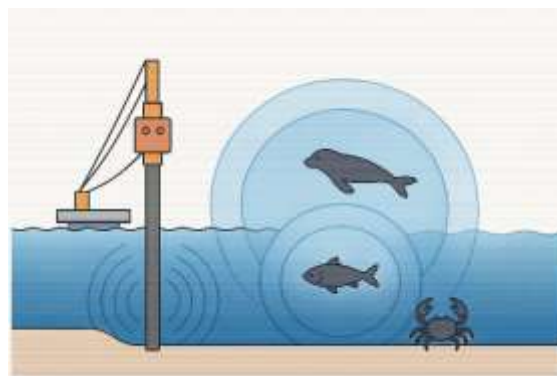
^۱ Audio masking

شکل ۳. مدل مفهومی پیامدهای جمعیتی اختلال صوتی (PCAD²) چندین مرحله را توصیف می‌کند که برای ارتباط دادن اختلال صوتی به اثرات بر جمعیت پستانداران دریایی ضروری است. (با اندکی تغییر برگرفته از NRC, 2005).

از این رو، شناسایی و ارزیابی سیمای صوتی ناشی از عملیات شمع‌کوبی در خلیج فارس، گامی اساسی در مدیریت پایدار محیط‌های ساحلی و توسعه‌ی سازه‌های فراساحلی به شمار می‌رود. این ارزیابی نه تنها 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 (NRC, 2005) می‌تواند تعادلی میان توسعه‌ی صنعتی و حفاظت از زیست‌مندان ارزشمند دریایی خلیج فارس برقرار کند (Popper et al., 2022).

خلیج فارس 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 (Shafiei Sabet, 2018). افزایش فعالیت‌های صنعتی و فراساحلی - به‌ویژه عملیات شمع‌کوبی برای نصب سکوهای نفت، گاز و اسکله‌ها - 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 (Slabbekoorn et al., 2010).

برای بررسی اثرات آلودگی‌های صوتی ناشی از شمع‌کوبی، لازم است گونه‌های هدف در خلیج فارس



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. (<https://chatgpt.com>).

افزایش تراز نوفه پس زمینه^۱ در محیط‌های ساحلی می‌تواند الگوهای رفتاری گونه‌های دریایی را تغییر دهد؛ از جمله ترک زیستگاه، کاهش فعالیت تغذیه و تولیدمثل، یا حتی تغییر مسیرهای مهاجرت (Cones et al., 2022; Slabbekoorn et al., 2010). در مناطق حساس مانند خلیج فارس، 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 (Shafiei Sabet, 2018). افزون بر این، رسوب‌زایی و ارتعاشات مکانیکی ناشی از شمع‌کوبی می‌تواند بسترهای مرجانی و زیستگاه‌های کفزی را نیز تخریب کند.



² Population Consequences of Acoustic Disturbance

¹ Background noise level

بستر تمرکز کرده‌اند (Fakharian & Hosseinzadeh, 2011; Shamshirgaran & Ebrahimian Rostami, 2021 et al., 2026). بررسی‌های آکوستیکی مستقیم از اصوات ناشی از شمع‌کوبی - شامل اندازه‌گیری میدانی سطح فشار صوت، ویژگی‌های زمانی-طیفی اصوات ضربه‌ای و الگوی انتشار آن‌ها در محیط‌های کم‌عمق خلیج فارس - به‌طور محسوسی محدود است. این عدم توازن پژوهشی سبب شده است که سهم واقعی شمع‌کوبی در شکل‌دهی به سیمای صوتی خلیج فارس و شدت مواجهه‌ی زیستی آبزیان با این منبع صوتی، به‌صورت کمی و مبتنی بر داده‌های محلی، به‌روشنی مشخص نباشد.

ماهیت ضربه‌ای این منبع - را در محیط‌های دریایی مختلف گزارش کرده‌اند (McCauley et al., 2017; Lucke et al., 2011; Mueller-Blenkle et al., 2010).

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 (Shafiei Sabet, 2024).

با وجود توسعه‌ی گسترده‌ی پروژه‌های عمرانی فراساحلی در خلیج فارس - از جمله ساخت اسکله‌ها، سکوهای نفتی و زیرساخت‌های بندری که به‌طور عمده بر شمع‌کوبی متکی هستند - 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



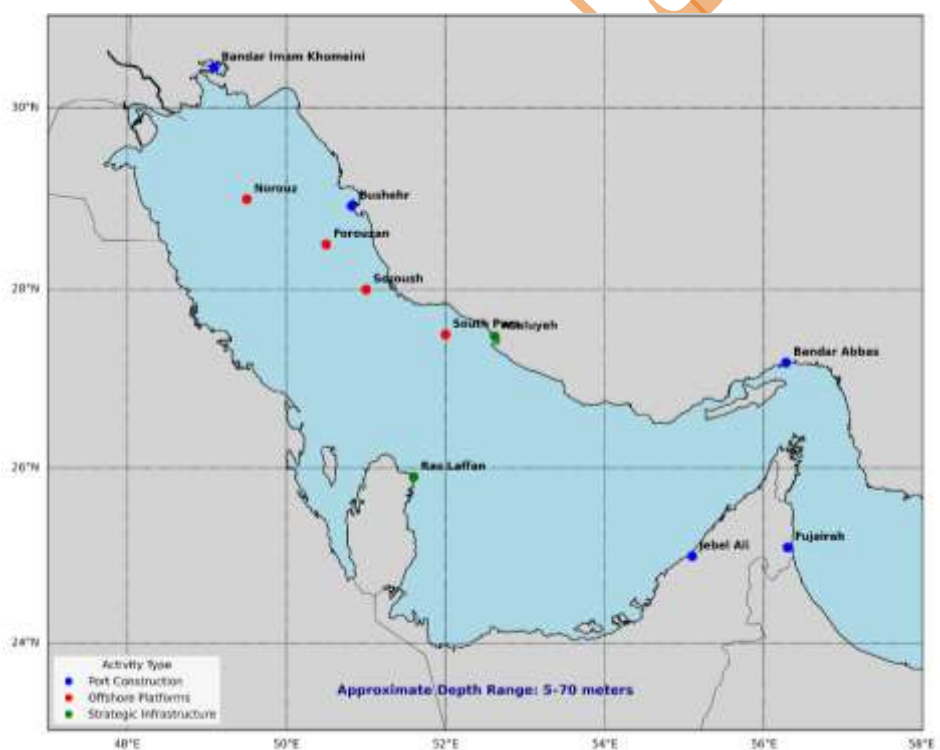
شکل ۴. مدل شماتیک دسته‌بندی انواع استرس‌ها ناشی از فعالیت‌های انسانی بر آبزیان دریایی. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تولیدشده است

از سوی دیگر، هرچند مطالعات بین‌المللی متعددی ویژگی‌های آکوستیکی شمع‌کوبی - از جمله اوج فشار صوت ($Peak\ SPL$ ، تراز مواجهه با صوت SEL^1) و

¹ Sound exposure level

حساسیت زیستی منطقه	تراز فشار صوت تخمینی (dB re 1 μ Pa) در فاصله ۱ متر از منبع	نوع بستر	عمق تقریبی (متر)	نوع فعالیت	منطقه
متوسط تا بالا	170–185	ماسه‌ای-گلی	10–25	ساخت اسکله	بندرعباس
بسیار بالا	185–195	گلی-سنگی	40–70	سکوهای نفتی	پارس جنوبی
متوسط	165–180	ماسه‌ای	5–20	توسعه بندر	بوشهر
بالا	180–190	گلی	30–60	سکوهای فراساحلی	سروش
متوسط	170–185	ماسه‌ای	15–35	بندر صنعتی	جبل علی (امارات)
بالا	180–190	گلی-سنگی	25–50	تأسیسات گازی	رأس لفان (قطر)

جدول ۱: ویژگی‌های صوتی مناطق شمع کوبی در خلیج فارس. جدول فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ و با تحلیل منابع Shamshirgaran, & Ebrahimi (2021, 2023)، مطالعات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی منطقه‌ای تولید شده است.



شکل ۵. مناطق کلیدی شمع کوبی در خلیج فارس نمایش داده شد. شهرهای ساحلی ایران شامل بندرعباس، بوشهر، عسلویه، بندر امام خمینی. میدان‌های نفتی فراساحلی شامل پارس جنوبی، سروش، نوروز، فروزان. بنادر صنعتی کشورهای همسایه شامل جبل علی (امارات)، رأس لفان (قطر)، فجیره (امارات). تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تولید شده است.

جدول ۲. مرور داده‌های اثر شمع کوبی بر گونه‌های جانوران دریایی. * منظور از فاصله اثر همان دامنه‌ی واکنش جانداران به موج آکوستیکی را نشان می‌دهد.

منبع علمی	نوع واکنش	فاصله اثر*	تراز فشار صوت / SPL	منبع صوت	گونه / گروه
Mueller-Blenkle et al., 2010	تغییر سرعت شنا و جهت‌گیری	0–1 km	144–156 dB re 1 μ Pa (Peak)	شمع کوبی با چکش هیدرولیک	Sole ماهیان کف زی
Mueller-Blenkle et al., 2010	تغییر رفتار، اجتناب از منبع	0–1.2 km	140–161 dB re 1 μ Pa	شمع کوبی	Cod ماهیان استخوانی
Iafrate et al., 2016	تغییر رفتار، کاهش فعالیت تغذیه	چند صد متر 1 km	152–157 dB re 1 μ Pa	شمع کوبی	Sheepshead / Grey Snapper
McCauley et al., 2017	کاهش تراکم و مرگ‌ومیر	0–1.2 km	202–220 dB re 1 μ Pa	شمع کوبی	Zooplankton
Kastelein et al., 2018	کاهش کارایی شکار، اجتناب از منطقه	2–7 km	SELss 125–143 dB re 1 μ Pa ² s	شمع کوبی	Harbor porpoise
Jones et al., 2021	تغییر رفتار تغذیه و مهاجرت	چند کیلومتر	بیش از 180 dB re 1 μ Pa	شمع کوبی	Longfin squid
Lucke et al., 2011	کاهش واکنش منفی	0–5 km	کاهش تا 90٪	شمع کوبی + پرده حباب بزرگ	Harbor porpoise
Dahl et al., 2015	اجتناب، اختلال در تغذیه، آسیب شنوایی	0–2 km	تا ۲۲۰ dB re 1 μ Pa	شمع کوبی	Various fish species

۸. نتیجه‌گیری

سیمای صوتی دریایی، به‌عنوان برآیند زیست صوت^۱، زمین صوت^۲ و انسان صوت^۳، نقشی مهم در عملکردهای بوم‌شناختی، ارتباطات درون‌گونه‌ای و رفتار آبریان 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، بهره‌گرفت.

به‌کارگیری موانع صوتی، از جمله حباب‌سازها یا موانع جامد در اطراف محل شمع‌کوبی، می‌تواند به کاهش شدت صوت کمک کند. در خلیج فارس، که پروژه‌های زیرساختی دریایی و سازه‌های ساحلی در حال توسعه‌اند، مطالعه‌ی اثرات آلودگی صوتی ناشی از شمع‌کوبی به‌ویژه در زیستگاه‌های حساس ضروری

¹ Biophony
² Geophony
³ Anthropophony

است. ثبت بلندمدت سیمای صوتی، ارزیابی اثرات نوفه بر گونه‌های کلیدی، و در نهایت مدل‌سازی الگوهای پراکنش^۱ 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 خلیج فارس، در هر دو سطح ملی و بین‌المللی، نقش‌آفرین باشند.

۹. تشکر و قدردانی

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

^۱ Scattering

1. 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.
2. Bayat Tork, M. M., Zad, A. A., & Ebrahimian, B. (2025). Bearing capacity assessment of driven piles at Southern Iran: A statistical and machine learning approach. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-33.
3. Casper, B. M., Smith, M. E., Halvorsen, M. B., Sun, H., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2013). 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.
4. Casper, B. M., Halvorsen, M. B., Matthews, F., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2013). Recovery of barotrauma injuries resulting from exposure to pile driving sound in two sizes of hybrid striped bass. *PloS one*, 8(9), e73844. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Fakharian, K., & Hosseinzadeh, A. I. (2011). Pile driving experiences in Persian Gulf calcareous sands. *Frontiers in Offshore Geotechnics II*.
8. 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.
9. Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Carlson, T. J., Woodley, C. M., & Popper, A. N. (2012). 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.
10. Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Woodley, C. M., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2012). Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS One*, 7(6), e38968.
11. 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.
12. Herbert-Read, J. E., Kremer, L., Brintjes, 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.
13. <https://ChatGPT.com>
14. 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).
15. 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.

16. 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.
17. Kight, C. R., & Swaddle, J. P. (2011). How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecology letters*, 14(10), 1052-1061.
18. 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.
19. Lafrate, 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Lucke, K., & Siemensma, M. (2013). International regulations on the impact of pile driving noise on marine mammals-A literature review.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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>.

31. National Research Council, Division on Earth, Life Studies, Commission on Geosciences, Committee on Low-Frequency Sound, & Marine Mammals. (1994). Low-frequency sound and marine mammals: Current knowledge and research needs.
32. 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.
33. Popper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of human-generated sound on fish. *Integrative Zoology*, 4(1), 43-52.
34. Popper, A. N., & Higgs, D. M. (2009). Fish: hearing, lateral lines (Mechanisms, role in behavior, adaptations to life underwater). *Marine Biology*, 372.
35. 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.
36. Roberts, L., Harding, H. R., Voellmy, I., Bruintjes, R., Simpson, S. D., Radford, A. N., & Elliott, M. (2016, July). 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.

46. 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.
47. 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.

Pile Driving and the Acoustic Soundscape of the Persian Gulf: A Review of Anthropogenic Underwater Noise and Its Environmental Implications

Saeed Shafiei Sabet*, Marziyeh Amini Fard, Zahra Samandar, Fatemeh Alizadeh Lademakhi

Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran, P.O.Box 1144

Abstract:

Human activities in marine areas-particularly pile-driving operations and other industrial processes associated with the construction and operation of refineries-generate intense underwater sound sources that can exert significant impacts on marine habitats and aquatic species. Pile driving operations can generate impulsive sounds with sound pressure level reaching up to 220 dB re $\mu\text{Pa}@1\text{m}$. Noise produced during pile-driving activities may cause physical injury, trigger temporary or permanent hearing impairment, and lead to behavioural avoidance responses in marine organisms. The Persian Gulf, as a geographically and economically critical region for Iran, has not yet been subjected to a comprehensive soundscape assessment, and adequate information on the intensity and distribution of these acoustic sources in the country's aquatic environments is lacking. This review article aims to introduce pile driving as a major anthropogenic sound source in the Persian Gulf and to examine its potential implications for the sustainability of marine ecosystems. The study underscores the importance of conducting systematic soundscape investigations in Iranian waters, especially in the Persian Gulf. Insufficient knowledge of anthropogenic acoustic profiles may hinder effective management and conservation of sensitive aquatic species. Ultimately, the paper emphasizes the urgent need for field-based surveys, frequency-domain acoustic analyses, and environmental impact assessments to inform the development of more effective conservation policies for this marine region.

Keywords: Persian Gulf, Pile driving, Habitat, Conservation policies, Aquatic animals