

مقدمه‌ای بر کمیت‌ها و شاخص‌های صوتی در پایش محیط‌های

آبی: مفاهیم، اندازه‌گیری، کاربردها و محدودیت‌ها

سعید شفیعی ثابت*

مرضیه امینی فرد

استادیار، عضو هیئت علمی گروه شیلات،

دانشجوی دکتری بوم‌شناسی، گروه شیلات،

دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان،

دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان،

صومعه‌سرا ایران صندوق پستی ۱۱۴۴

صومعه‌سرا ایران صندوق پستی ۱۱۴۴

s.shafiei.sabet@guilan.ac.ir

aminifard@msc.guilan.ac.ir

چکیده

گسترش پایش صوتی غیرفعال، حجم زیادی از داده‌های آکوستیکی را در مطالعات زیست‌صوتیات و بوم‌صوتیات ایجاد کرده است و تحلیل این داده‌ها نیازمند شناخت صحیح کمیت‌ها و شاخص‌های صوتی و محدودیت‌های تفسیری آنهاست. هدف این مقاله، ارائه مروری آموزشی بر مهم‌ترین کمیت‌ها و شاخص‌های قابل استخراج از ثبت‌های صوتی، با تأکید بر کاربرد آنها در پایش محیط‌های آبی است. ابتدا مبانی داده‌های صوتی دیجیتال و کمیت‌های پایه شامل مقدار مؤثر ریشه میانگین مربعات، دامنه اوج، تراز فشار صوت، چگالی طیفی توان، بسامد غالب و پهنای باند طیفی بررسی می‌شوند. سپس شاخص‌های پرکاربرد بوم‌صوتیات شامل NDSI، BI، AEI، ADI، ACI و شاخص‌های آنتروپی از نظر مفهوم، کاربرد و محدودیت‌های تفسیری معرفی می‌شوند. شاخص‌های صوتی می‌توانند برای خلاصه‌سازی و مقایسه تغییرات زمانی و مکانی سیمای صوتی مفید باشند، اما مقادیر آنها به بازه بسامدی، مقیاس زمانی، تنظیمات پردازش و ویژگی‌های زیستگاه وابسته است و نباید بدون اعتبارسنجی به‌عنوان سنجح مستقیم تنوع زیستی یا وضعیت اکولوژیکی تفسیر شوند. انتخاب هدفمند کمیت‌ها و شاخص‌ها، همراه با گزارش شفاف روش‌ها، می‌تواند به تحلیل نظام‌مند و تکرارپذیر داده‌های صوتی در پایش محیط‌های آبی کمک کند.

واژگان کلیدی: پایش صوتی غیرفعال، بوم‌صوتیات، زیست‌صوتیات، سیمای صوتی، شاخص‌های بوم‌صوتیات

۱. مقدمه

می‌تواند الگوهای زمانی و مکانی محیط را آشکار سازد.

مجموعه این اصوات در یک محیط و در مقیاس‌های

اصوات محیط‌های آبی ترکیبی از نشانه‌های زیستی،

اصوات حاصل از فرایندهای فیزیکی و ناشی از

فعالیت‌های انسانی را دربر می‌گیرند و تحلیل آنها

* نویسنده مسئول

زمانی و مکانی مختلف، سیمای صوتی^۱ را شکل می‌دهد [۱،۲]. به بیانی دیگر، در چارچوب طبقه‌بندی بوم صوتیات یا اکوآکوستیک^۲، این منابع معمولاً در سه گروه کلی زیست‌صوت، زمین صوت و انسان صوت یا اصوات ناشی از فعالیت‌های انسانی طبقه‌بندی می‌شوند [۳]. در محیط‌های آبی، اهمیت صوت به دلیل ویژگی‌های انتشار آن و نقش آن در ارتباط، جهت‌یابی، انتخاب زیستگاه، شناسایی شکار و شکارگر و سایر رفتارهای زیستی بسیاری از جانوران بیشتر برجسته می‌شود [۴-۶].

توسعه سامانه‌های ثبت دیجیتال و پایش صوتی غیرفعال^۳ امکان ثبت پیوسته یا دوره‌ای محیط صوتی را در بازه‌های زمانی طولانی فراهم کرده است [۷]. پایش صوتی غیرفعال به دلیل ماهیت غیرتهاجمی، قابلیت پایش بلندمدت و امکان بررسی الگوهای زمانی و مکانی، در مطالعات زیست‌صوتیات، بوم صوتیات و ارزیابی تغییرات محیطی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸-۱۰]. در اکوسیستم‌های آب شیرین نیز پایش صوتی غیرفعال به‌عنوان ابزاری برای پایش پیوسته و بررسی ساختار سیمای صوتی مطرح شده است [۸].

با افزایش حجم داده‌های صوتی ثبت‌شده، بررسی و تحلیل دستی تمام فایل‌های صوتی دشوار و زمان‌بر می‌شود. استخراج شاخص‌ها و متغیرهای کمی از فایل‌های صوتی برای خلاصه‌سازی حجم بالای داده‌ها، مقایسه میان نمونه‌ها یا زیستگاه‌ها و تحلیل الگوهای موجود در داده‌های صوتی اهمیت زیادی پیدا کرده

است [۱۱-۱۳، ۷]. این متغیرهای کمی را می‌توان به‌طور کلی از نظر کارکرد در دو گروه در نظر گرفت: نخست، کمیت‌ها و ویژگی‌های پایه آکوستیکی مانند مقدار فشار صوت مؤثر^۴، تراز فشار صوت^۵، چگالی طیفی توان^۶، بسامد غالب و پهنای باند [۷، ۱۴-۱۵]. دوم، شاخص‌های بوم صوتیات مانند شاخص پیچیدگی صوتی^۷، شاخص تنوع صوتی^۸، شاخص یکنواختی صوتی^۹، شاخص زیست صوتی^{۱۰}، شاخص اختلاف نرمال شده صوتی^{۱۱} و شاخص‌های مبتنی بر آنتروپی. گروه نخست جنبه‌هایی از دامنه، انرژی یا ساختار طیفی سیگنال را توصیف می‌کند (شکل ۱)، درحالی‌که گروه دوم با استفاده از روابط محاسباتی، بخشی از ساختار زمانی و بسامدی سیمای صوت را در قالب مقادیر خلاصه ارائه می‌دهد [۱۵-۱۷، ۱۱].



شکل ۱. مسیر شماتیک گردش کار پیشنهادی تبدیل فایل صوتی دیجیتال به متغیرهای کمی و شاخص‌های صوتی. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۵/۰۶/۰۱ تولید شده است.

باوجود مزایای شاخص‌های صوتی در خلاصه‌سازی و مقایسه داده‌های صوتی، تفسیر مقادیر حاصل از آن‌ها نیازمند احتیاط است. مقدار و عملکرد یک شاخص می‌تواند علاوه بر ویژگی‌های سیمای صوتی تحت تأثیر

⁷ Acoustic Complexity Index (ACI)

⁸ Acoustic Diversity Index (ADI)

⁹ Acoustic Evenness Index (AEI)

¹⁰ Bioacoustic Index (BI)

¹¹ Normalized Difference Soundscape Index (NDSI)

¹ Soundscape

² Ecoacoustics

³ Passive Acoustic Monitoring (PAM)

⁴ Root Mean Square (RMS)

⁵ Sound Pressure Level (SPL)

⁶ Power Spectral Density (PSD)

طراحی نمونه‌برداری و پارامترهای پردازش از جمله طول قطعه صوتی مورد تحلیل، محدوده بسامدی، نرخ نمونه‌برداری، تنظیمات تحلیل طیفی و ویژگی‌های محیط قرار گیرد [۱۱-۱۲، ۱۸]. بنابراین، استفاده از تنظیمات یکسان یا پیش‌فرض برای همه زیستگاه‌ها و اهداف پژوهشی مناسب نیست. پارامترهای محاسبه شاخص‌ها باید متناسب با پرسش پژوهش، ویژگی‌های صوتی محیط و محدوده بسامدی مورد مطالعه انتخاب و به‌طور شفاف گزارش شوند [۱۸، ۱۲].

افزون بر این ملاحظات روش‌شناختی در محیط‌های آبی محدودیت‌های مرتبط با اندازه‌گیری فیزیک صوت نیز باید در نظر گرفته شود. در محیط‌های آبی، گزارش کمیت‌های مطلق صوتی به کالیبراسیون زنجیره ثبت و مشخصات حساسیت و پاسخ بسامدی هیدروفون وابسته است [۱۹، ۷]. همچنین، هیدروفون‌های متداول عمدتاً فشار صوت را ثبت می‌کنند، درحالی‌که حرکت ذره‌ای یکی از اجزای مهم میدان صوتی زیرآب است و برای بسیاری از ماهیان و بی‌مهرگان اهمیت زیستی دارد [۲۰-۲۱]. شاخص‌ها و سایر متغیرهای استخراج‌شده از ثبت‌های مبتنی بر فشار صوت باید با توجه به کمیت فیزیکی اندازه‌گیری‌شده و محدودیت‌های سامانه ثبت تفسیر شوند و نباید لزوماً نماینده همه مؤلفه‌های صوتی مرتبط با ادراک جانوران آبی تلقی شوند.

هدف مقاله حاضر، ارائه یک مرور علمی-آموزشی بر مهم‌ترین کمیت‌ها و شاخص‌های صوتی قابل استخراج از ثبت‌های محیطی، با تأکید بر کاربرد و محدودیت‌های آن در پایش محیط‌های آبی است. در این راستا، ابتدا مبانی نمایش و تحلیل سیگنال‌های صوتی و کمیت‌های پایه آکوستیکی معرفی می‌شوند. سپس

شاخص‌های کاربرد بوم‌صوتیات، اثر پارامترهای پردازش بر مقادیر حاصل، ملاحظات مربوط به کالیبراسیون و اندازه‌گیری، و اصول انتخاب و تفسیر شاخص‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

نوآوری مقاله حاضر در ارائه چارچوبی یکپارچه و ویژه پایش صوتی محیط‌های آبی است که کمیت‌های پایه آکوستیکی را از شاخص‌های بوم‌صوتی تفکیک می‌کند و الزامات کالیبراسیون و تفاوت دامنه دیجیتال با فشار صوت مطلق را توضیح می‌دهد. این چارچوب از تفسیر مستقیم شاخص‌های صوتی به‌عنوان سنجه قطعی تنوع زیستی یا سلامت اکولوژیکی جلوگیری کرده و استفاده نظام‌مند و تکرارپذیر از داده‌های صوتی را در مطالعات محیط‌زیست، زیست‌شناسی آبزیان و شیلات تسهیل می‌کند.

۲. از محیط صوتی تا کمیت‌ها و شاخص‌های صوتی

سیمای صوتی هر زیستگاه حاصل برهم‌نهی اصوات ناشی از منابع زیستی، فرایندهای طبیعی غیرزیستی و فعالیت‌های انسانی است و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ساختار و پویایی محیط فراهم کند [۱]. توسعه ضبط‌کننده‌های دیجیتال خودکار و روش‌های پایش صوتی غیرفعال، امکان ثبت محیط صوتی را در بازه‌های زمانی طولانی و در مقیاس‌های مکانی مختلف فراهم کرده است [۷]. در محیط‌های آبی نیز داده‌های آکوستیکی می‌توانند برای توصیف زیستگاه صوتی، شناسایی حضور یا فعالیت موجودات دارای توانایی تولید صوت و بررسی تغییرات زمانی و مکانی سیمای صوتی به‌کار روند [۱۳، ۷].

با افزایش حجم داده‌های حاصل از پایش‌های صوتی، بررسی مستقیم و دستی همه ثبت‌ها با استفاده از شکل موج، طیف‌نگاره، به‌ویژه در مطالعات بلندمدت، دشوار و زمان‌بر می‌شود. یکی از رویکردهای مورد استفاده برای پردازش و خلاصه‌سازی چنین مجموعه داده‌هایی، استخراج ویژگی‌های کمی و محاسبه شاخص‌های صوتی از سیگنال است [۱۱،۲۲،۲]. این متغیرها می‌توانند جنبه‌هایی از سیگنال یا سیمای صوتی، مانند دامنه و سطح صوت، انرژی، توزیع بسامدی، تغییرپذیری زمانی، پیچیدگی و نحوه توزیع انرژی در بازه‌های بسامدی را به صورت عددی توصیف یا خلاصه کنند [۱۱،۱۳]. تاکنون بیش از ۶۰ شاخص صوتی در مطالعات بوم صوتیات گزارش شده است. عملکرد این شاخص‌ها وابسته به هدف مطالعه، نوع زیستگاه، ویژگی‌های منابع صوتی و روش‌های ثبت و پردازش است و هیچ شاخص واحدی را نمی‌توان برای همه کاربردها و محیط‌ها مناسب دانست [۱۱،۲۲،۲].

در این زمینه، تمایز میان کمیت‌ها و ویژگی‌های پایه صوتی و شاخص‌های بوم صوتیات اهمیت دارد. کمیت‌هایی مانند فشار صوت مؤثر، تراز فشار صوت، چگالی طیفی توان و ویژگی‌هایی مانند بسامد غالب، جنبه‌های مشخصی از دامنه یا ساختار طیفی سیگنال را توصیف می‌کنند [۷،۲]. در مقابل، شاخص‌های بوم صوتیات مانند شاخص پیچیدگی آکوستیکی و شاخص اختلاف نرمال شده سیمای صوتی، اطلاعات زمانی و/یا بسامدی ثبت صوتی را بر اساس روابط ریاضی مشخص در یک مقدار عددی خلاصه می‌کنند تا جنبه‌هایی از ساختار سیمای صوتی قابل مقایسه شوند [۱۱،۲]. این

تمایز برای تفسیر صحیح نتایج ضروری است؛ زیرا مقدار یک شاخص صوتی به تنهایی معادل اندازه‌گیری مستقیم غنای گونه‌ای، فراوانی جانداران یا تنوع زیستی نیست و رابطه آن با متغیرهای زیستی باید در هر زمینه پژوهشی ارزیابی و اعتبارسنجی شود [۱۱،۲۴،۲۳].

۳. کمیت‌های پایه آکوستیکی

کمیت‌ها و ویژگی‌های پایه آکوستیکی، نخستین سطح توصیف کمی ثبت‌های صوتی را فراهم می‌کنند و جنبه‌هایی از دامنه، فشار صوت، توزیع انرژی و ساختار بسامدی سیگنال را نشان می‌دهند (جدول ۱). انتخاب و تفسیر این متغیرها باید متناسب باهدف مطالعه، محدوده بسامدی موردنظر و مشخصات سامانه ثبت انجام شود [۷،۱۵]. در مطالعات صوت زیرآب، کمیت‌های مطلق مانند سطح فشار صوت تنها در صورت وجود اطلاعات کالیبراسیون و مشخصات زنجیره اندازه‌گیری قابل گزارش هستند [۱۹].

۳-۱. مقدار مؤثر ریشه میانگین مربعات و فشار صوت مؤثر^۱

مقدار مؤثر ریشه میانگین مربعات برای احتساب فشار صوت مؤثر یکی از متداول‌ترین معیارهای خلاصه‌سازی دامنه سیگنال در یک بازه زمانی است. رابطه (۱):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

این مقدار با مربع کردن نمونه‌ها، محاسبه میانگین و سپس گرفتن ریشه دوم به دست می‌آید و نمایی از دامنه مؤثر سیگنال ارائه می‌کند. x_i می‌تواند نمونه

^۱ Root Mean Square (RMS)

۳-۳. تراز فشار صوت^۴

سطح فشار صوت کمیتی لگاریتمی برای بیان فشار مؤثر صوت نسبت به فشار مرجع است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود. رابطه (۲):

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p_{rms}}{p_{ref}}$$

که در اندازه‌گیری صوت زیر آب، $p_{ref} = 1 \mu Pa$

است و معمولاً به صورت $1 \mu Pa$ re dB گزارش می‌شود. در نبود کالیبراسیون زنجیره ثبت، مقادیر نمونه‌های دیجیتال فقط در مقیاس نسبی یا dBFS قابل گزارش‌اند و تبدیل آن‌ها به $1 \mu Pa$ re dB معتبر نیست. هنگام گزارش تراز فشار صوت، محدوده بسامدی و بازه زمانی اندازه‌گیری نیز باید مشخص باشند [۷].

۳-۴. چگالی طیفی توان^۵

چگالی طیفی توان، توزیع توان سیگنال را برحسب بسامد و به ازای واحد پهنای باند نشان می‌دهد. در داده‌های فشار صوت کالیبره‌شده، چگالی طیفی توان با واحد Pa^2/Hz یا $\mu Pa^2/Hz$ بیان می‌شود و تراز لگاریتمی آن به صورت $1 \mu Pa^2/Hz$ re dB گزارش می‌گردد. مقدار آن به روش برآورد تحلیل طیف، طول پنجره، هم‌پوشانی، تابع پنجره و تفکیک بسامدی وابسته است. بنابراین این پارامترها باید در روش مطالعه گزارش شوند [۷].

۳-۵. بسامد غالب^۶

بسامد غالب معمولاً بسامدی است که بیشترین دامنه یا توان طیفی را نشان می‌دهد. این متغیر برای توصیف اصوات نسبتاً تونال و مقایسه رویدادهای صوتی مفید

دیجیتال یا، در سامانه کالیبره‌شده، نمونه فشار صوت باشد. اگر فایل کالیبره نشده باشد، مقدار RMS دامنه سیگنال در واحد دیجیتال یا نسبی گزارش می‌شود. تنها پس از تبدیل نمونه‌ها به فشار صوت با استفاده از اطلاعات کالیبراسیون زنجیره ثبت، می‌توان مقدار حاصل را فشار صوت مؤثر نامید و با واحد پاسکال یا میکروپاسکال گزارش کرد. در مقابل، در یک زنجیره ثبت کالیبره‌شده، مقدار فشار صوت مؤثر می‌تواند مبنای محاسبه سطح فشار صوت قرار گیرد. مرکانت و همکاران (۲۰۱۵) RMS را یکی از متداول‌ترین روش‌های توصیف سطح متوسط صوت در داده‌های محیطی معرفی کرده‌اند.

۳-۲. دامنه اوج^۱

دامنه اوج بیشترین مقدار مطلق لحظه‌ای سیگنال در بازه موردبررسی را نشان می‌دهد و برای شناسایی رویدادهای کوتاه، پالس‌ها و همچنین بررسی برش دامنه سیگنال^۲ صوتی مفید است. در داده‌های کالیبره شده بررسی اصوات ضربه‌ای، این کمیت می‌تواند به صورت فشار صوت اوج بیان شود. همچنین اختلاف اوج به اوج^۳ فاصله میان بیشترین و کمترین مقدار لحظه‌ای سیگنال را نشان می‌دهد. این کمیت‌ها در بررسی اصوات ضربه‌ای مکمل فشار صوت مؤثر هستند. زیرا فشار صوت مؤثر دامنه مؤثر سیگنال را در یک بازه زمانی توصیف می‌کند و لزوماً بزرگی بیشینه یک پالس کوتاه را منعکس نمی‌کند. هنگام گزارش مقدار اوج باید نوع کمیت، مقیاس اندازه‌گیری و بازه زمانی تحلیل مشخص شود.

^۵ Power Spectral Density (PSD)

^۶ Dominant frequency

^۱ Peak amplitude

^۲ Clipping

^۳ Peak-to-Peak

^۴ Sound Pressure Level (SPL)

است. در سیگنال‌های پهن باند یا دارای چند قله طیفی، یک مقدار منفرد ممکن است نماینده مناسبی از ساختار کلی صوت نباشد. از این‌رو بررسی شکل موج یا طیف‌نگاره در کنار آن ضروری است [۷، ۱۵].

۶-۳. پهنای باند طیفی^۱

پهنای باند طیفی میزان گستردگی توزیع انرژی در حوزه بسامد را توصیف می‌کند. اصوات تونال معمولاً انرژی متمرکزتری در محدوده بسامدی باریک دارند، درحالی‌که اصوات پهن باند انرژی را در گستره وسیع‌تری از بسامدها توزیع می‌کنند. از آنجاکه روش‌های مختلفی برای تعریف و محاسبه پهنای باند وجود دارد، نوع تعریف، محدوده بسامدی و روش محاسبه باید در گزارش پژوهش مشخص شوند. تفسیر کمیت‌های آکوستیکی به مقیاس زمانی و محدوده بسامدی تحلیل وابسته است. برای مثال، فشار صوت مؤثر و تراز فشار صوت با تغییر بازه زمانی محاسبه و چگالی طیفی توان و بسامد غالب با تغییر محدوده تحلیل یا تفکیک بسامدی می‌توانند مقادیر متفاوتی نشان دهند. مقایسه میان ثبت‌ها مستلزم استفاده از روش‌های تحلیل سازگار و گزارش شفاف بازه زمانی، محدوده بسامدی، تنظیمات طیفی و وضعیت کالیبراسیون است. این کمیت‌ها اطلاعات مکملی درباره دامنه، سطح و ساختار بسامدی ثبت فراهم می‌کنند، اما هیچ‌یک به‌تنهایی توصیف کاملی از سیمای صوت ارائه نمی‌دهد و تفسیر ترکیبی آن‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای استفاده از شاخص‌های بوم صوتیات در بخش بعدی فراهم کند.

^۱ Spectral bandwidth

جدول ۱. مقایسه کمیت‌های پایه آکوستیکی.

کمیت	مفهوم اصلی	خروجی معمول	کاربرد	ملاحظه مهم
RMS	دامنه مؤثر سیگنال	نسبی، دیجیتال یا فشار کالیبره	توصیف سطح متوسط سیگنال	بدون کالیبراسیون، SPL محسوب نمی‌شود
(Peak amplitude)	بیشینه دامنه لحظه‌ای	نسبی، dBFS یا فشار	بررسی پالس‌ها، clipping و رویدادهای کوتاه	تعریف و روش محاسبه Peak باید مشخص باشد
SPL	فشار مؤثر نسبت به فشار مرجع	dB re 1 μ Pa در آب	فشار مؤثر نسبت به فشار مرجع	نیازمند کالیبراسیون سامانه ثبت است
PSD	توان بر واحد پهنای باند	$\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2 \text{ Hz}^{-1}$ در داده کالیبره	توصیف توزیع طیفی صوت و نویز زمینه	به تنظیمات تحلیل طیفی وابسته است
(Dominant frequency)	بسامد دارای بیشترین دامنه یا توان	Hz	توصیف مؤلفه بسامدی غالب	برای سیگنال‌های چندقله‌ای محدودیت دارد
(Spectral bandwidth)	گسترده‌گی توزیع انرژی در حوزه بسامد	Hz	مقایسه ساختار باریک باند و پهن باند	تعریف محاسباتی پهنای باند باید گزارش شود

۴. شاخص‌های پرکاربرد بوم صوتیات

شاخص‌های بوم صوتیات مجموعه‌ای از متغیرهای عددی هستند که برای خلاصه‌سازی ویژگی‌های زمانی، بسامدی یا ترکیبی یک ثبت صوتی به کار می‌روند (جدول ۲). برخلاف کمیت‌های فیزیکی مانند تراز فشار صوت یا چگالی طیف توان، این شاخص‌ها معمولاً حاصل الگوریتم‌هایی هستند که بخشی از ساختار سیمای صوت را در یک مقدار عددی خلاصه می‌کنند (جدول ۳). بسیاری از شاخص‌های متداول ابتدا در مطالعات زمینی و به‌ویژه برای بررسی اجتماعات پرندگان توسعه‌یافته‌اند. بنابراین انتقال مستقیم تنظیمات، بازه‌های بسامدی یا تفسیرهای اولیه آن‌ها به محیط‌های آبی باید با احتیاط انجام شود [۱۱-۱۳]. مطالعات روش‌شناختی نیز نشان داده‌اند که شاخص‌ها به جنبه‌های متفاوتی از سیمای صوت حساس‌اند و هیچ شاخص منفردی قادر به بازنمایی تمام اطلاعات یک ثبت صوتی نیست [۱۲، ۲].

۴-۱. شاخص پیچیدگی صوتی^۱

این شاخص برای کمی‌سازی تغییرات کوتاه‌مدت دامنه در طول زمان و در بازه‌های بسامدی مختلف توسعه‌یافته است و بر اختلاف دامنه میان گام‌های زمانی متوالی در هر بازه بسامدی استوار است (شکل ۲). این شاخص ابتدا با این فرض معرفی شد که بسیاری از اصوات زیستی، مانند آواز پرندگان، تغییرپذیری زمانی بیشتری نسبت به برخی اصوات پیوسته ناشی از فعالیت‌های انسانی دارند [۲۵]. مقدار بالاتر ACI الزاماً نشان‌دهنده تنوع زیستی بیشتر نیست؛ زیرا منابع غیرزیستی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی با تغییرات سریع دامنه نیز می‌توانند مقدار آن را افزایش دهند. افزون بر این، طول ثبت، بازه بسامدی و تنظیمات تحلیل طیفی بر مقدار ACI اثر می‌گذارند؛ بنابراین در محیط‌های آبی، این شاخص باید همراه با بررسی طیف‌نگاره (شکل ۳) و شناخت منابع اصلی صوتی تفسیر شود [۱۲، ۱۸-۱۳].

۴-۲. شاخص تنوع صوتی^۲

این شاخص توزیع فعالیت صوتی را میان چند بازه بسامدی خلاصه می‌کند (شکل ۲). در محاسبه این شاخص، محدوده بسامدی به بازه‌هایی تقسیم‌شده، سهم فعالیت صوتی بالاتر از یک آستانه مشخص در هر بازه بسامدی تعیین و سپس با استفاده از مفهوم آنتروپی شانون، میزان پراکندگی فعالیت صوتی میان بازه‌ها محاسبه می‌شود [۱۷]. مقادیر بالاتر شاخص تنوع صوتی عموماً نشان‌دهنده توزیع گسترده‌تر فعالیت صوتی در بازه‌های بسامدی است. مقدار شاخص به محدوده پهنای بازه‌های بسامدی و آستانه تشخیص وابسته است. در محیط‌های آبی این پارامترها باید متناسب با ویژگی‌های صوتی زیستگاه و سؤال پژوهش انتخاب شوند و تنظیمات توسعه‌یافته برای محیط‌های زمینی نباید بدون اعتبارسنجی مستقیماً به سیمای صوتی آبی منتقل شوند [۱۱-۱۳].

۴-۳. شاخص یکنواختی صوتی^۳

شاخص یکنواختی صوتی (AEI) با اعمال ضریب جینی بر نسبت فعالیت صوتی بالاتر از آستانه تعیین‌شده در بازه‌های بسامدی محاسبه می‌شود [۳۲، ۱۷]. برخلاف برداشتی که ممکن است از نام این شاخص ایجاد شود، افزایش مقدار AEI نشان‌دهنده نابرابری بیشتر و تمرکز فعالیت صوتی در تعداد کمتری از بازه‌های بسامدی است (شکل ۲). درحالی‌که مقادیر پایین‌تر، توزیع یکنواخت‌تر فعالیت صوتی میان بازه‌ها را نشان می‌دهند. AEI مکمل عددی ADI نیست؛ ADI تنوع توزیع را با آنتروپی شانون و AEI نابرابری همان توزیع را با ضریب جینی خلاصه می‌کند [۱۷، ۱۲]. بنابراین استفاده هم‌زمان از چند شاخص باید با توجه به افزونگی اطلاعاتی و هدف پژوهش انجام شود [۱۱-۱۲].

۴-۴. شاخص زیست‌صوتی^۴

^۳ Acoustic Evenness Index; AEI

^۴ Bioacoustic Index; BI

^۱ Acoustic Complexity Index; ACI

^۲ Acoustic Diversity Index; ADI

شاخص زیستی نخست برای توصیف فعالیت صوتی پرندگان معرفی شد و بر محاسبه مساحت طیفی بالاتر از یک سطح پایه در یک محدوده بسامدی مشخص استوار است (شکل ۲). مقدار آن تحت تأثیر هم سطح صوت و هم گستره بسامدی فعالیت صوتی قرار می گیرد [۲۶]. یکی از مهم ترین ملاحظات در کاربرد شاخص زیست صوتی، انتخاب بازه بسامدی است. بازه های پیش فرض توسعه یافته برای محیط های زمینی ممکن است در محیط های آبی بخشی از فعالیت زیستی را حذف کنند یا منابع غیرزیستی و ناشی از فعالیت های انسانی را نیز دربر گیرند؛ بنابراین محدوده بسامدی شاخص زیست صوتی باید متناسب با طیف واقعی زیستگاه، گروه های دارای توانایی تولید صوت و پاسخ بسامدی سامانه ثبت تعیین و گزارش شود [۱۳].

۴-۵. شاخص تفاضل نرمال شده سیمای صوت^۱

برای مقایسه نسبت انرژی صوتی در دو بازه بسامدی تعریف شده به کار می رود و عبارت است از. رابطه (۳):

$$NDSI = \frac{B - A}{B + A}$$

که در آن A و B به ترتیب بیانگر انرژی یا توان منتسب به مؤلفه های ناشی از فعالیت های انسانی و زیستی هستند (شکل ۲). برای مقادیر غیر منفی A و B، به شرط مثبت بودن مجموع آن ها، NDSI در بازه -۱ تا +۱ قرار می گیرد؛ اگر هر دو صفر باشند، شاخص تعریف نشده است. مقادیر مثبت نشان دهنده بیشتر بودن توان یا انرژی در باند B نسبت به باند A هستند؛ تفسیر این وضعیت به عنوان غلبه نسبی مؤلفه زیستی، مستلزم اعتبارسنجی انتساب باندهای انتخاب شده به منابع زیستی و انسانی است [۲۷]. اعتبار تفسیر شاخص

تفاضل نرمال شده سیمای صوتی به انتخاب صحیح بازه های بسامدی وابسته است؛ زیرا در محیط های آبی، اصوات ناشی از فعالیت های طبیعی زیستی، انسانی و طبیعی غیرزیستی می توانند هم پوشانی بسامدی قابل توجهی داشته باشند. بازه های متعارف توسعه یافته برای محیط های زمینی نباید بدون بررسی طیف نگاره و اعتبارسنجی منابع صوتی به محیط های آبی منتقل شوند [۱۲-۱۳].

۴-۶. شاخص های آنالیز صوتی

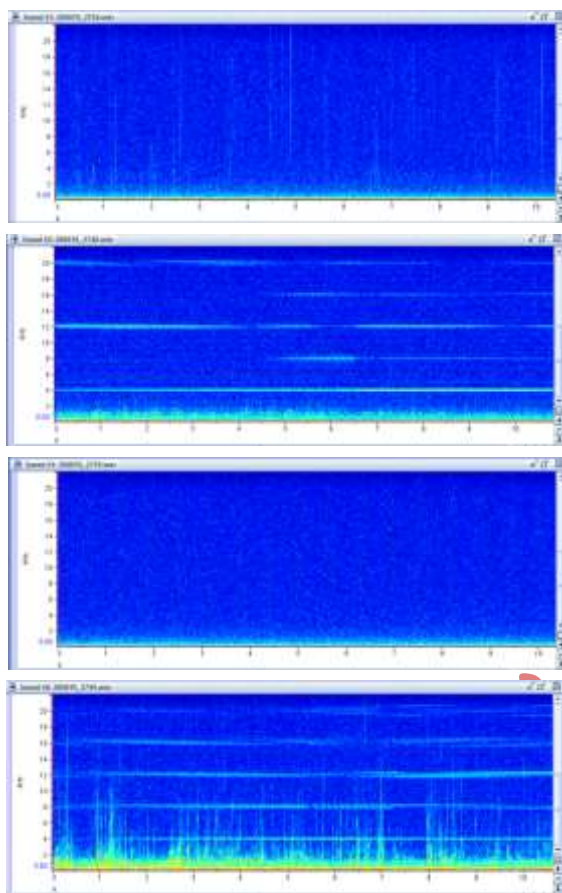
شاخص های آنالیز صوتی، یکنواختی توزیع مقادیر سیگنال را در زمان و بسامد توصیف می کنند (شکل ۲). سوئر و همکاران (۲۰۰۸) دو مؤلفه اصلی شامل آنالیز زمانی (H_t) و آنالیز طیفی (H_f) را معرفی کردند [۱۶]. آنالیز زمانی، یکنواختی توزیع نرمال شده پوش دامنه را در زمان، و آنالیز طیفی، یکنواختی توزیع نرمال شده مقادیر طیفی را در بسامد توصیف می کند. نوع طیف مورد استفاده، اعم از دامنه یا توان، باید مشخص شود. ترکیب این دو، شاخص آنالیز صوتی کلی را فراهم می سازد. رابطه (۴):

$$H = H_t \times H_f$$

مقادیر بالاتر معمولاً نشان دهنده توزیع یکنواخت تر مقادیر مورد استفاده در محاسبه هستند، اما لزوماً بیانگر فعالیت زیستی یا تنوع زیستی بیشتر نیستند. برای مثال، نویز پهن باند پیوسته نیز می تواند آنالیز را افزایش دهد. تفسیر این شاخص باید همراه با بررسی

^۱ Normalized Difference Soundscape Index; NDSI

طیف‌نگاره و شناخت منابع صوتی انجام شود [۱۴، ۱۲].
[۱۱].



شکل ۳. تصویر طیف نگاره‌های نمونه‌های صوتی ۱ تا ۴ به ترتیب از بالا به پایین. داده‌ها برگرفته از آمینی فرد و همکاران، داده‌های منتشر نشده.



شکل ۲. نمایش شماتیک و مفهومی شاخص‌های پرکاربرد بوم‌صوتیات. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۵/۰۶/۰۱ تولیدشده است.

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های صوتی در چهار نمونه ۱۰ ثانیه‌ای. داده‌ها برگرفته از آمینی فرد و همکاران، داده‌های منتشر نشده.

شاخص صوتی	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
پیچیدگی صوتی (ACI)	۷۷.۷۷۴	۶۸.۸۷۱	۶۸.۵۶۸	۷۷.۵۱۷
تنوع صوتی (ADI)	۱.۹۶۱	۱.۲۲	۲.۲۲	۱.۲۲
یکنواختی صوتی (AEI)	۰.۲۲۱	۰.۷۷۸	۰.۱۲	۰.۷۷۸
آنزیمی طیفی (HF)	۰.۲۲۲	۰.۲۲۲	۰.۹۱۱	۰.۲۱۸
آنزیمی زمانی (HT)	۰.۹۹۲	۰.۹۹۲	۰.۹۹۲	۰.۹۹۲
آنزیمی کلی (H)	۰.۵۵۸	۰.۷۷۸	۰.۹۱۲	۰.۶۷۷

جدول ۲. خلاصه ویژگی‌های شاخص‌های بوم صوتیات

شاخص	ویژگی اصلی موردسنجش	مهم‌ترین مزیت	محدودیت کلیدی
ACI	تغییرات زمانی در بازه‌های بسامدی	حساس به تغییرپذیری سریع صوت	حساسیت به منابع پالسی غیرزیستی و تنظیمات تحلیل
ADI	توزیع فعالیت صوتی میان بازه‌های بسامدی	خلاصه‌سازی تنوع طیفی	وابسته به پهنای بازه بسامدی و آستانه فعالیت صوتی
AEI	نابرابری توزیع فعالیت صوتی میان بازه‌های بسامدی، بر پایه ضریب جینی	توصیف تمرکز طیفی در کنار ADI، بدون رابطه مکمل عددی	احتمال افزونگی اطلاعاتی و وابستگی به تعریف بازه‌ها
BI	مساحت زیر طیف نسبت به سطح پایه در بازه بسامدی منتخب	سنجش نسبی فعالیت در محدوده موردنظر	نیازمند انتخاب و اعتبارسنجی بازه بسامدی مناسب
NDSI	تفاضل نرمال شده توان یا انرژی دو باند بسامدی	مقایسه نسبی دو مؤلفه سیمای صوت	تفسیر وابسته به تعریف و اعتبارسنجی بازه‌های بسامدی
Entropy	یکنواختی یا پیچیدگی زمانی و طیفی	خلاصه‌سازی ساختار کلی صوت	حساس به نویز پهن باند و معادل مستقیم تنوع زیستی نیست

۵. کاربرد شاخص‌های صوتی در پایش

محیط‌های آبی

شاخص‌های صوتی امکان خلاصه‌سازی حجم بالای داده‌های حاصل از پایش صوتی غیرفعال و مقایسه تغییرات زمانی و مکانی سیمای صوتی را فراهم می‌کنند. در اکوسیستم‌های آب شیرین، پایش بوم صوتیات می‌تواند اطلاعاتی درباره فعالیت ماهیان و بی‌مهرگان، فرایندهای فیزیکی-شیمیایی و منابع صوتی ناشی از فعالیت‌های انسانی فراهم کند (شکل ۴) و به‌عنوان روشی غیرتهاجمی برای پایش پیوسته مطرح شود [۸]. برای مثال، [۲۸] با استفاده از چند شاخص صوتی در ۱۲ جریان آب شیرین، تفاوت‌های مکانی و الگوهای شبانه‌روزی متمایزی را میان سیمای صوتی مکان‌ها نشان دادند. چنین رویکردهایی می‌توانند برای مقایسه ایستگاه‌ها، بررسی تغییرات روزانه و فصلی و ایجاد خطوط مبنای صوتی برای پایش‌های بلندمدت به‌کار روند.

در محیط‌های دریایی نیز شاخص‌های بوم صوتیات در زیستگاه‌هایی مانند صخره‌های مرجانی، بسترهای سنگی، مناطق ساحلی و نواحی فراساحلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بیشتر شاخص‌های رایج ابتدا برای محیط‌های زمینی توسعه‌یافته‌اند و هنوز شاخص یا پروتکل واحدی برای همه زیستگاه‌های دریایی وجود ندارد [۱۳]. افزون بر این، عوامل محیطی و فیزیکی مانند عمق، بستر، جریان و شرایط انتشار صوت و نیز هم‌پوشانی منابع زیستی، غیرزیستی و ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌توانند مقادیر شاخص‌ها را تحت تأثیر قرار دهند؛ بنابراین تفاوت میان شاخص‌ها نباید مستقیماً به تفاوت‌های زیستی نسبت داده شود.

افزون بر عمق و ویژگی‌های بستر، تغییرات دما، شوری و فشار با تغییر نیم‌رخ سرعت صوت، مسیر انتشار، شکست و تمرکز انرژی صوتی را دگرگون می‌کنند. در آب‌های عمیق، چینه‌بندی چگالی و گرادیان‌های دمایی فصلی یا دائمی می‌توانند موجب تشکیل کانال‌های صوتی شوند؛ همچنین کشندها و امواج داخلی با ایجاد تغییرات زمانی در میدان سرعت صوت، مسیر پرتوهای صوتی و افت انتقال را تغییر می‌دهند [۳۰، ۲۹]. از این رو، تفاوت مقادیر شاخص‌های صوتی میان ایستگاه‌ها یا فصل‌ها باید در کنار اطلاعات عمق، دما، شوری و، در صورت امکان، نیم‌رخ سرعت صوت تفسیر شود.

شاخص‌های صوتی همچنین می‌توانند برای بررسی تغییرات مرتبط با فعالیت‌های انسانی و شناسایی انحراف از شرایط صوتی معمول مفید باشند، اما رابطه آن‌ها با تنوع زیستی یا وضعیت اکولوژیکی الزاماً مستقیم نیست [۱۳، ۳۲، ۳۱]. مناسب‌ترین کاربرد این شاخص‌ها در محیط‌های آبی، استفاده از آن‌ها به‌عنوان ابزارهای خلاصه‌سازی، مقایسه و پایش تغییرات سیمای صوتی در کنار بررسی طیف‌نگاره و در صورت امکان، داده‌های مستقل زیستی و محیطی است.



شکل ۴. کاربرد شاخص‌های صوتی در پایش محیط‌های آبی. تصویر فوق با استفاده از ابزار ChatGPT 5.0 در تاریخ ۱۴۰۵/۰۶/۰۱ تولید شده است.

۶. انتخاب و تفسیر صحیح شاخص‌ها

انتخاب کمیت یا شاخص صوتی باید بر اساس پرسش پژوهش، ویژگی‌های زیستگاه و منابع صوتی مورد انتظار انجام شود؛ زیرا هیچ شاخص واحدی همه ابعاد سیمای صوتی را توصیف نمی‌کند و محاسبه تعداد زیادی شاخص بدون هدف مشخص لزوماً اطلاعات بیشتری فراهم نمی‌سازد [۱۲، ۲]. برای مثال، تراز فشار صوت و چگالی طیف توان به ترتیب برای توصیف تراز فشار صوت و توزیع طیفی مناسب‌اند، درحالی‌که شاخص پیچیدگی صوتی تغییرپذیری زمانی-بسامدی، شاخص تنوع صوتی و شاخص یکنواختی صوتی توزیع فعالیت میان بازه‌های بسامدی، شاخص زیست صوتی فعالیت طیفی در یک بازه منتخب و شاخص تفاضل نرمال شده سیمای صوتی سهم نسبی دو محدوده بسامدی تعریف شده را خلاصه می‌کنند. هر شاخص باید در چارچوب ویژگی‌ای که واقعاً اندازه‌گیری یا خلاصه می‌کند تفسیر شود.

شاخص‌های بوم صوتیات را نباید مستقیماً معادل تنوع زیستی یا وضعیت اکولوژیکی دانست. زیرا عوامل غیرزیستی و ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند جریان آب، بارندگی، شناورها و سایر منابع صوتی نیز می‌توانند مقادیر آن‌ها را تغییر دهند. متآنالیز [۲۳] نیز نشان داد که ارتباط شاخص‌های صوتی با معیارهای تنوع زیستی در مجموع متوسط و میان مطالعات بسیار متغیر است. بنابراین، استفاده از مجموعه‌ای محدود از شاخص‌های مکمل، متناسب باهدف مطالعه، نسبت به محاسبه گسترده شاخص‌ها بدون توجیه روش‌شناختی ارجح است.

تفسیر نتایج زمانی قابل‌اعتمادتر است که الگوهای صوتی با ثبت اصلی، طیف‌نگاره در صورت امکان،

داده‌های مستقل زیستی، محیطی یا فعالیت‌های انسانی مقایسه شوند [۳۳]. در نتیجه، شاخص‌های صوتی بهتر است ابزارهایی برای خلاصه‌سازی داده‌ها، مقایسه سیمای صوتی و آشکارسازی تغییرات تلقی شوند، نه جایگزین مستقیم سنجش‌های زیستی. انتخاب مناسب شاخص، شناخت محدودیت‌های آن و اعتبارسنجی نتایج، سه اصل اساسی برای استفاده صحیح از شاخص‌های صوتی در پایش محیط‌های آبی هستند.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پایش صوتی غیرفعال و استخراج کمیت‌ها و شاخص‌های صوتی، امکان خلاصه‌سازی و مقایسه ثبت‌های طولانی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی سیمای صوتی محیط‌های آبی را فراهم می‌کند. کمیت‌ها و شاخص‌های صوتی دسته‌بندی شده جنبه‌های متفاوتی از ساختار صوتی را توصیف می‌کنند. هیچ شاخصی به تنهایی نماینده کامل شرایط صوتی، تنوع زیستی یا وضعیت اکولوژیکی نیست. انتخاب شاخص باید متناسب با پرسش پژوهش و ویژگی‌های زیستگاه انجام شود و تفسیر آن، در صورت امکان، با داده‌های زیستی و محیطی مستقل اعتبارسنجی گردد.

۸. قدردانی

نویسندگان از نظرات مفید و ارزشمند سردبیر و داوران محترم که موجب بهبود کیفیت مقاله شد، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند. از ابزارهای هوش مصنوعی برای کمک به جست‌وجوی برخی منابع علمی و طراحی شکل‌های مفهومی استفاده شد. این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۳۷۳۹۷" انجام شده است.

- [1] Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H., & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203–216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
- [2] Sueur, J., Farina, A., Gasc, A., Pieretti, N., & Pavoine, S. (2014). Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica*, 100, 772–781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>
- [3] Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape ecology*, 26(9), 1213–1232. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>
- [4] Montgomery, J. C., Jeffs, A., Simpson, S. D., Meekan, M., & Tindle, C. (2006). Sound as an orientation cue for the pelagic larvae of reef fishes and decapod crustaceans. *Advances in marine biology*, 51, 143–196. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(06\)51003-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(06)51003-X)
- [5] 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. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005>
- [6] Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, 74(3), 635–651. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw205>
- [7] Merchant, N. D., Frstrup, K. M., Johnson, M. P., Tyack, P. L., Witt, M. J., Blondel, P., & Parks, S. E. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(3), 257–265. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12330>
- [8] Linke, S., Gifford, T., Desjonquères, C., Tonolla, D., Aubin, T., Barclay, L., & Sueur, J. (2018). Freshwater ecoacoustics as a tool for continuous ecosystem monitoring. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(4), 231–238. <https://doi.org/10.1002/fee.1779>
- [9] Desjonquères, C., Gifford, T., & Linke, S. (2020). Passive acoustic monitoring as a potential tool to survey animal and ecosystem processes in freshwater environments. *Freshwater Biology*, 65(1), 7–19. <https://doi.org/10.1111/fwb.13356>
- [10] Mooney, T. A., Di Iorio, L., Lammers, M., Lin, T. H., Nedelec, S. L., Parsons, M., & Stanley, J. (2020). Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. *Royal Society open science*, 7(8), 201287. <https://doi.org/10.1098/rsos.201287>
- [11] Bradfer Lawrence, T., Gardner, N., Bunnefeld, L., Bunnefeld, N., Willis, S. G., & Dent, D. H. (2019). Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(10), 1796–1807. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254>
- [12] Bradfer Lawrence, T., Desjonqueres, C., Eldridge, A., Johnston, A., & Metcalf, O. (2023). Using acoustic indices in ecology: Guidance on study design, analyses and interpretation. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(9), 2192–2204. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14194>
- [13] Minello, M., Calado, L., & Xavier, F. C. (2021). Ecoacoustic indices in marine ecosystems: a review on recent developments, challenges, and future directions. *ICES Journal of Marine Science*, 78(9), 3066–3074. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab193>

- [14] Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (2008). Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18(2), 213-226. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753600>
- [15] Sueur, J. (2018). *Sound analysis and synthesis with R* (p. 637). Cham: Springer.
- [16] Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PloS one*, 3(12), e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>
- [17] Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., Doucette, J., & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape ecology*, 26(9), 1233-1246. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>
- [18] Kemp, J., Azofeifa-Solano, J. C., Barneche, D. R., Brooker, R., Arévalo, J. E., Erbe, C., & Parsons, M. (2025). Impact of acoustic index parameters on soundscape comparisons. *Methods in Ecology and Evolution*, 16(5), 872-885. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.70007>
- [19] Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. National Physical Laboratory, Good Practice Guide No. 133
- [20] Nedelec, S. L., Campbell, J., Radford, A. N., Simpson, S. D., & Merchant, N. D. (2016). Particle motion: the missing link in underwater acoustic ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(7), 836-842. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12544>
- [21] Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), 470-488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
- [22] Buxton, R. T., McKenna, M. F., Clapp, M., Meyer, E., Stabenau, E., Angeloni, L. M., & Wittemyer, G. (2018). Efficacy of extracting indices from large-scale acoustic recordings to monitor biodiversity. *Conservation Biology*, 32(5), 1174-1184. <https://doi.org/10.1111/cobi.13119>
- [23] Alcocer, I., Lima, H., Sugai, L. S. M., & Llusia, D. (2022). Acoustic indices as proxies for biodiversity: a metaanalysis. *Biological Reviews*, 97(6), 2209-2236. <https://doi.org/10.1111/brv.12890>
- [24] Gannon, W. L., Dunlop, R., Hawkins, A., & Thomas, J. A. (2022). Collecting, documenting, and archiving bioacoustical data and metadata. *Exploring animal behavior through sound*, 1, 87-110.
- [25] Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological indicators*, 11(3), 868-873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>
- [26] Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J., & Martin, R. E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 17(8), 2137-2144. <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>
- [27] Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, J., & Joo, W. (2012). The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological informatics*, 12, 50-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>
- [28] Decker, E., Parker, B., Linke, S., Capon, S., & Sheldon, F. (2020). Singing streams: Describing freshwater soundscapes with the help of acoustic indices. *Ecology and Evolution*, 10(11), 4979-4989. <https://doi.org/10.1002/ece3.6251>
- [29] Hosseini, S. H., Akbarinasab, M., & Khalilabadi, M. R. (2018). Numerical simulation of the effect internal tide on the propagation sound in the Oman Sea. *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(1), 215-225. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2018.221834.1006867>

- [30] Khalilabadi, M. R., & Daneshmehr, S. (2024). Study of sound speed profile and formation of sound channels in deep waters of North Indian Ocean. *Journal of Acoustical Society of Iran*, 11(2), 27–32. <http://joasi.ir/article-1-279-en.html>
- [31] Greenhalgh, J. A., Genner, M. J., Jones, G., & Desjonquères, C. (2020). The role of freshwater bioacoustics in ecological research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(3), e1416. <https://doi.org/10.1002/wat2.1416>
- [32] Villanueva-Rivera, L. J., & Pijanowski, B. C. (2018). *soundecology: Soundscape ecology*. R package version 1.3.3. <https://CRAN.R-project.org/package=soundecology>
- [33] Shafiei Sabet, S., & Amini Fard, M. (2026). Applications of Audacity in acoustic data processing and analysis: an introductory guide to aquatic bioacoustics and soundscape studies. *Journal of Vibration and Sound*, Article e742573. https://jvs.isav.ir/article_742573.html

Introduction to acoustic quantities and indices for monitoring aquatic environments: concepts, measurement, applications, and limitations

Abstract

The expansion of passive acoustic monitoring has generated large volumes of acoustic data in bioacoustic and ecoacoustic studies, making a sound understanding of acoustic metrics, indices, and their interpretative limitations increasingly important. This article provides a scientific and educational review of the main acoustic quantities and indices that can be extracted from sound recordings, with particular emphasis on their application in monitoring aquatic environments. First, the fundamentals of digital acoustic data and key acoustic quantities, including root mean square (RMS), peak amplitude, sound pressure level (SPL), power spectral density (PSD), dominant frequency, and spectral bandwidth, are introduced. Commonly used ecoacoustic indices, including ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, and acoustic entropy indices, are then reviewed in terms of their underlying concepts, applications, and interpretative limitations. Acoustic indices can be useful for summarizing and comparing temporal and spatial variation in soundscapes; however, their values depend on frequency range, temporal scale, processing settings, and habitat characteristics, and they should not be interpreted as direct measures of biodiversity or ecological status without independent validation. Purpose-driven selection of acoustic quantities and indices, together with transparent methodological reporting, can support more systematic and reproducible analysis of acoustic data in aquatic environmental monitoring.

Keywords: Passive acoustic monitoring; Ecoacoustics; Bioacoustics; Soundscape; Ecoacoustic indices