مقاله ترویجی

کاربرد نرم‌افزار Audacity در پردازش و بررسی داده‌های صوتی: راهنمای مقدماتی برای زیست‌صوتیات آبزیان و مطالعات سیمای صوتی

سعید شفیعی ثابت*
استادیار، عضو هیات علمی گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا ایران صندوق پستی ۱۱۴۴
s.shafiei.sabet@guilan.ac.ir

مرضیه امینی فرد
دانشجوی دکتری بوم‌شناسی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا ایران صندوق پستی ۱۱۴۴
aminifard@msc.guilan.ac.ir

نسخه

چکیده

پردازش و بررسی اولیه فایل‌های صوتی یکی از مراحل اساسی در مطالعات زیست‌صوتیات، بوم صوتیات و پایش صوتی محیط‌های آبی است. هدف این مقاله، معرفی کاربردهای نرم‌افزار رایگان و متن‌باز Audacity و ارائه یک راهنمای آموزشی برای استفاده از آن در مشاهده، پردازش اولیه و سامان‌دهی داده‌های صوتی محیط‌های آب شیرین و دریایی است. مقاله با رویکردی آموزشی و مروری، مراحل اصلی کار با این نرم‌افزار را از ورود و کنترل کیفیت فایل‌های صوتی تا مشاهده شکل موج، نمایش طیف‌نگاره، بررسی طیف بسامدی، انتخاب و برچسب‌گذاری رویدادهای صوتی، انجام پردازش‌های پایه و آماده‌سازی داده‌ها برای تحلیل‌های تکمیلی تشریح می‌کند. همچنین، اصول ثبت فراداده، سازمان‌دهی فایل‌ها و یک گردشکار پیشنهادی برای استفاده منظم و تکرارپذیر از نرم‌افزار در مطالعات صوتی ارائه‌شده است. این نرم‌افزار می‌تواند برای آموزش مفاهیم پایه صوت، بازبینی کیفی فایل‌ها، شناسایی اولیه رویدادهای صوتی و آماده‌سازی داده‌ها، به‌ویژه برای دانشجویان و پژوهشگران، ابزاری در دسترس و کم‌هزینه باشد. بااین‌حال، این نرم‌افزار جایگزین سامانه‌های تخصصی اندازه‌گیری و تحلیل آکوستیکی کالیبره‌شده نیست و در مطالعات کمی پیشرفته باید همراه با روش‌ها و ابزارهای تخصصی مناسب به کار رود. درمجموع، استفاده آگاهانه از این نرم‌افزار می‌تواند نقطه آغاز مناسبی برای آموزش و پردازش اولیه داده‌های صوتی و توسعه مطالعات زیست‌صوتیات و سیمای صوتی در محیط‌های آبی باشد.

واژگان کلیدی: Audacity؛ زیست‌صوتیات؛ سیمای صوتی؛ آکوستیک محیطی؛ پردازش صوت؛ تحلیل طیف‌نگاره؛ پایش صوتی؛ محیط‌های آبی

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

صوت یکی از مؤلفه‌های مهم محیط‌های طبیعی است و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره فرایندهای زیستی، شرایط فیزیکی محیط و فعالیت‌های انسانی فراهم کند [۱-۲]. در سال‌های اخیر، توسعه سامانه‌های ضبط دیجیتال و روش‌های پایش صوتی، استفاده از داده‌های آکوستیکی را در حوزه‌هایی مانند زیست‌صوتیات[۱]، بوم صوتیات[۲]، بوم‌شناسی سیمای صوتی و پایش تنوع زیستی گسترش داده است. در مطالعات سیمای صوتی، اصوات یک محیط معمولاً در ارتباط با منابع زیستی، فرایندهای طبیعی غیرزیستی و فعالیت‌های انسانی بررسی می‌شوند [۱]. در محیط‌های آبی نیز ثبت و تحلیل صوت می‌تواند برای بررسی حضور و فعالیت جانوران، شناسایی منابع صوتی و ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی محیط صوتی به کار رود [۲].

یکی از رویکردهای مهم در این زمینه، پایش صوتی غیرفعال[۳] است که امکان ثبت طولانی‌مدت اصوات محیط را بدون ایجاد محرک صوتی فراهم می‌کند. افزایش حجم فایل‌های حاصل از ضبط‌کننده‌های دیجیتال و هیدروفون‌ها، نیاز به ابزارهایی ساده و در دسترس برای مشاهده، بازبینی، برچسب‌گذاری[۴] و پردازش اولیه این داده‌ها را افزایش داده است. اگرچه نرم‌افزارهای تخصصی متعددی برای تحلیل زیست‌صوتی و پردازش پیشرفته سیگنال وجود دارند، هزینه، پیچیدگی یا نیاز به آموزش تخصصی می‌تواند استفاده از آن‌ها را برای پژوهشگران محدود کند. در محیط‌های رودخانه‌ای، توسعه روش‌های آکوستیکی مبتنی بر داپلر، زمان طی‌شده و تیکه‌نگاری صوتی، کاربرد گسترده پردازش و تفسیر سیگنال‌های صوتی را در پایش جریان آب نشان می‌دهد [۳].

کاربرد روش‌های آکوستیکی در محیط‌های آبی تنها به شناسایی و تحلیل اصوات زیستی یا انسانی محدود نمی‌شود و می‌تواند برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی محیط نیز به کار رود. بحرینی مطلق و همکاران (۲۰۲۲) کاربرد تیکه‌نگاری صوتی را در پایش پیوسته دما و سرعت جریان‌های آبی و اقیانوسی بررسی کرده‌اند [۴]. در میان رویکردهای پیشرفته تحلیل نویز زیرآبی در محیط‌های دریایی، خلیل‌آبادی (۲۰۲۳) از طیف‌نگاره مل[۵] برای بازنمایی زمان–بسامد سیگنال و از شبکه عصبی پیچشی[۶] برای استخراج خودکار ویژگی‌ها و شناسایی و طبقه‌بندی نویز تابشی کشتی‌ها استفاده کرده است [۵]. در رویکردی دیگر، فرخ‌نیا و همکاران (۲۰۲۶) با توسعه یک الگوریتم مبتنی بر تیکه‌نگاری صوتی و استفاده از Python برای شبیه‌سازی ره‌گیری پرتو، کاربرد ابزارهای محاسباتی تخصصی را در تحلیل پیشرفته داده‌های آکوستیکی محیط‌های آبی نشان دادند [۶].

نرم‌افزار Audacity یک برنامه رایگان، متن‌باز در سیستم‌های عامل مختلف برای ضبط، ویرایش و پردازش فایل‌های صوتی است [۷]. این نرم‌افزار اگرچه به‌طور اختصاصی برای زیست‌صوتیات یا اندازه‌گیری‌های آکوستیکی طراحی نشده است، مجموعه‌ای از قابلیت‌های کاربردی برای بررسی مقدماتی داده‌های صوتی فراهم می‌کند. مشاهده شکل موج و طیف‌نگاره، بررسی طیف بسامدی، انتخاب بازه‌های زمانی، برچسب‌گذاری رویدادهای صوتی، قطعه‌بندی فایل و اجرای برخی پردازش‌های اولیه ازجمله این قابلیت‌ها هستند [۸-۱۰]. چنین امکاناتی می‌تواند برای آموزش مفاهیم پایه صوت و آشنایی اولیه با ساختار زمانی و بسامدی سیگنال‌ها مفید باشد [۱۱-۱۲].

نسخه قبل از ویراستاری

در مطالعات زیست‌صوتیات آبزیان، Audacity می‌تواند برای بازبینی اولیه فایل‌های ضبط‌شده با هیدروفون، شناسایی رویدادهای صوتی، تعیین حدود زمانی رویدادها، مشاهده ساختار طیفی و آماده‌سازی بخش‌های موردنظر برای تحلیل‌های تخصصی‌تر مورداستفاده قرار گیرد. این کاربردها می‌توانند در مطالعه اصوات جانوری، منابع انسانی صوت و سیمای صوتی رودخانه‌ای، تالابی، ساحلی و دریایی نیز مفید باشند. دسترسی رایگان و محیط نسبتاً ساده نرم‌افزار، آن را به گزینه‌ای مناسب برای آموزش مقدماتی پردازش صوت، به‌ویژه در محیط‌های آموزشی و پژوهشی با محدودیت دسترسی به نرم‌افزارهای تجاری، تبدیل می‌کند.

بر این اساس، هدف مقاله حاضر ارائه یک راهنمای علمی-آموزشی فشرده برای استفاده از Audacity در مشاهده، سازمان‌دهی و پردازش مقدماتی داده‌های صوتی، با تأکید بر کاربردهای آن در زیست‌صوتیات آبزیان، بوم صوتیات و مطالعات سیمای صوتی آبی است. در ادامه، مفاهیم پایه داده‌های صوتی دیجیتال، محیط نرم‌افزار، شکل موج و طیف‌نگاره، برچسب‌گذاری رویدادهای صوتی، پردازش مقدماتی، ثبت فراداده[۷]، گردشکار پیشنهادی در پژوهش‌های آکوستیکی بررسی می‌شوند.

۲. مبانی داده‌های صوتی دیجیتال

برای استفاده صحیح از Audacity و تفسیر داده‌های صوتی، آشنایی با چند مفهوم پایه شامل زمان[۸]، دامنه[۹]، بسامد[۱۰]، نرخ نمونه‌برداری[۱۱]، عمق بیت[۱۲]، شکل موج[۱۳] و طیف‌نگاره[۱۴] ضروری است (جدول ۱). یک سیگنال صوتی پس از ثبت توسط میکروفون یا هیدروفون و تبدیل به داده دیجیتال، به مجموعه‌ای از نمونه‌های عددی تبدیل می‌شود که تغییرات سیگنال را در طول زمان نمایش می‌دهند. کیفیت و محدوده اطلاعات قابل ثبت در این فرایند تا حد زیادی به نرخ نمونه‌برداری و عمق بیت وابسته است [۱۳].

۲-۱. زمان، دامنه و بسامد

زمان موقعیت و مدت وقوع یک رویداد صوتی را مشخص می‌کند و معمولاً برحسب ثانیه یا دقیقه بیان می‌شود. دامنه[۱۵] بیانگر اندازه نسبی تغییرات سیگنال ثبت‌شده است. در نمایش پیش‌فرض شکل موج Audacity، دامنه دیجیتال معمولاً در مقیاسی از ۱- تا ۱+ نمایش داده می‌شود [۱۴].

بسامد تعداد چرخه‌های یک نوسان در واحد زمان است و با واحد هرتز[۱۶] بیان می‌شود. ساختار بسامدی یکی از ویژگی‌های مهم برای توصیف بسیاری از اصوات زیستی، طبیعی و ناشی از فعالیت‌های انسانی است. مشاهده هم‌زمان تغییرات زمانی و بسامدی یک سیگنال می‌تواند به شناسایی مقدماتی رویدادهای صوتی و مقایسه الگوهای مختلف کمک کند.

۲-۲. نرخ نمونه‌برداری

نرخ نمونه‌برداری تعداد نمونه‌هایی است که در هر ثانیه از سیگنال ثبت می‌شوند و با هرتز (Hz) یا کیلوهرتز (kHz) بیان می‌شود [۱۵-۱۳]. انتخاب نرخ نمونه‌برداری باید با محدوده بسامدی موردمطالعه هماهنگ باشد؛ بر اساس قضیه

نسخه قبل از ویراستاری

نایکویست–شانون، در ثبت مستقیم دیجیتال، نرخ نمونه‌برداری باید بیشتر از دو برابر بالاترین بسامد موردنیاز باشد و در عمل، حاشیه مناسب برای عملکرد فیلتر ضدهم‌پوشانی نیز در نظر گرفته شود [۱۳].

علاوه بر آن، هیدروفون یا میکروفون، پیش‌تقویت‌کننده، مبدل و سایر اجزای زنجیره ثبت نیز باید قادر به ثبت محدوده بسامدی موردنظر باشند [۱۵]. افزایش نرخ نمونه‌برداری، حجم داده و فضای ذخیره‌سازی موردنیاز را نیز افزایش می‌دهد [۱۳].

۲-۳. عمق بیت

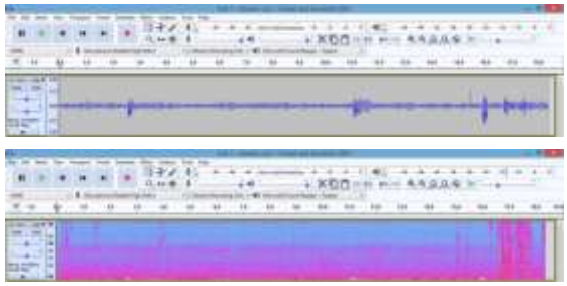
عمق بیت تعداد بیت‌های مورداستفاده برای نمایش مقدار هر نمونه صوتی است و بر دقت نمایش تغییرات دامنه و محدوده دینامیکی فایل اثر می‌گذارد [۱۳,۱۶,۱۵]. به‌طورکلی، افزایش عمق بیت امکان نمایش دقیق‌تر دامنه‌های مختلف سیگنال را فراهم می‌کند، هرچند کیفیت واقعی ثبت علاوه بر این عامل به مشخصات سخت‌افزار و کل زنجیره اندازه‌گیری وابسته است [۱۶]. بنابراین، نرخ نمونه‌برداری و عمق بیت دو مفهوم متفاوت هستند: نرخ نمونه‌برداری عمدتاً با تفکیک زمانی و محدوده بسامدی قابل ثبت ارتباط دارد، درحالی‌که عمق بیت با تفکیک دامنه و محدوده دینامیکی مرتبط است.

۲-۴. شکل موج و طیف‌نگاره

شکل موج تغییرات دامنه سیگنال را در طول زمان نمایش می‌دهد و نمای پیش‌فرض فایل صوتی در Audacity است [۱۴]. این نمایش برای مشاهده مدت رویدادها، تغییرات نسبی دامنه، سکوت‌ها، سیگنال‌های گذرا و همچنین تشخیص برخی موارد اشباع یا برش سیگنال مفید است (شکل ۱). بااین‌حال، شکل موج اطلاعات مستقیم و کاملی درباره ترکیب بسامدی صوت ارائه نمی‌کند.

در مقابل، طیف‌نگاره تغییر انرژی یا دامنه نسبی اجزای بسامدی را در طول زمان به‌صورت تصویری نشان می‌دهد [۸]. در این نمایش، محور افقی معمولاً زمان، محور عمودی بسامد و شدت یا رنگ نمایش‌دهنده قدرت نسبی مؤلفه‌های بسامدی است. طیف‌نگاره به‌ویژه برای مشاهده ساختار زمانی-بسامدی اصوات جانوری، رویدادهای کوتاه، اصوات پیوسته و منابع صوتی مختلف کاربرد دارد. Audacity امکان مشاهده جداگانه شکل موج و طیف‌نگاره یا نمایش هم‌زمان آن‌ها را فراهم می‌کند [۸]. درنتیجه، شکل موج و طیف‌نگاره باید به‌عنوان دو نمایش مکمل در نظر گرفته شوند. شکل موج برای بررسی ساختار زمانی و تغییرات دامنه مناسب است، درحالی‌که طیف‌نگاره اطلاعات بیشتری درباره توزیع بسامدی سیگنال در طول زمان فراهم می‌کند. انتخاب صحیح نرخ نمونه‌برداری، عمق بیت و شیوه نمایش داده، نخستین گام برای بررسی علمی و قابل تکرار فایل‌های صوتی در Audacity است.

نسخه قبل از ویراستاری



شکل ۱. نمای شماتیک سیگنال صوتی ماهی کاد اقیانوس اطلس در شکل موج (پنل بالا) و طیف‌نگاره (پنل پایین)[۱۷]. شکل موج تغییرات دامنه نسبی سیگنال را در طول زمان نشان می‌دهد، درحالی‌که طیف‌نگاره توزیع محتوای بسامدی سیگنال را در طول زمان نمایش می‌دهد.

برای تمرین عملی و بازتولید مراحل نشان‌داده‌شده در شکل ۱، از پایگاه‌های صوتی در دسترس عمومی مانند FishSoundsبرای نمونه‌های صوتی ماهیان [۱۸]، The Freshwater Sounds Archiveبرای اصوات آب شیرین [۱۹]، Watkins Marine Mammal Sound Database برای اصوات پستانداران دریایی [۲۰] و NOAA NCEI Passive Acoustic Data Archive برای داده‌های پایش صوتی و سیمای صوتی دریایی [۲۱] قابل استفاده می باشد. فایل‌های صوتی قابل دریافت از این منابع، با رعایت شرایط مجوز و نحوه استناد هر پایگاه، می‌توانند در Audacity برای مشاهده شکل موج، طیف‌نگاره، طیف بسامدی، انتخاب رویداد و سایر فرایندهای معرفی‌شده در این مقاله به کار روند.

جدول ۱ .مفاهیم پایه داده‌های دیجیتال و کاربرد آن‌ها در بررسی فایل‌های صوتی.

مفهوم	تعریف کوتاه	واحد / نمایش	اهمیت در بررسی صوت
زمان(Time)	مدت وقوع رویداد صوتی	ثانیه(s)	تعیین زمان شروع، پایان و مدت رویداد

نسخه قبل از ویراستاری

دامنه (Amplitude)	اندازه نسبی تغییرات سیگنال ثبت‌شده	دامنه نسبی	بررسی تغییرات نسبی سیگنال و شناسایی اشباع یا برش
بسامد (Frequency)	تعداد چرخه‌های نوسان در واحد زمان	هرتز(Hz)	توصیف ساختار طیفی و تمایز رویدادهای صوتی
نرخ نمونه‌برداری (Sample Rate)	تعداد نمونه‌های ثبت‌شده از سیگنال در هر ثانیه	هرتز یا کیلوهرتز	تعیین محدوده بسامدی قابل ثبت و بازنمایی
عمق بیت (Bit Depth)	تعداد بیت‌های مورداستفاده برای نمایش مقدار هر نمونه	بیت (bit)	مرتبط با تفکیک دامنه و محدوده دینامیکی
شکل موج (Waveform)	نمایش تغییرات دامنه سیگنال در طول زمان	دامنه × زمان	بررسی ساختار زمانی، سکوت‌ها و رویدادهای گذرا
طیف‌نگاره (Spectrogram)	نمایش تغییر محتوای بسامدی سیگنال در طول زمان	بسامد × زمان	بررسی ساختار زمانی–بسامدی و شناسایی اولیه رویدادها

۳. کاربرد Audacity در زیست‌صوتیات آبزیان و مطالعات سیمای صوتی

زیست‌صوتیات آبزیان و بوم‌شناسی سیمای صوتی از داده‌های صوتی برای مطالعه تولید و دریافت صوت توسط جانوران، شناسایی منابع صوتی و بررسی تغییرات محیط آکوستیکی استفاده می‌کنند. در محیط‌های آبی، ثبت طولانی‌مدت صوت با هیدروفون و سامانه‌های خودکار، یکی از روش‌های مهم پایش صوتی غیرفعال است و می‌تواند اطلاعاتی درباره فعالیت جانوران، فرایندهای طبیعی و حضور منابع انسانی صوت فراهم کند[۲۴-۲,۲۲]. Audacity جایگزین سامانه‌های تخصصی پایش و تحلیل زیست‌صوتی نیست، اما می‌تواند در مراحل اولیه بازبینی، گوش‌دادن، مشاهده، انتخاب و برچسب‌گذاری داده‌ها نقش مفیدی داشته باشد.

۳-۱. بازبینی اولیه فایل‌ها

یکی از کاربردهای ساده Audacity، بازبینی اولیه فایل‌های ثبت‌شده در محیط‌های رودخانه‌ای، تالابی، دریاچه‌ای، ساحلی و دریایی است. پژوهشگر می‌تواند فایل خام را وارد نرم‌افزار کرده و با استفاده ازشکل موج و طیف نگاره، کیفیت ضبط، وجود سیگنال، مدت رویدادها و ساختار تقریبی زمانی-بسامدی آن‌ها را بررسی کند. همچنین الگوهای صوتی پیوسته و ناپیوسته نیز قابل ارزیابی است [۲۷,۲۶,۲۵]. این مرحله می‌تواند پیش از انتقال داده‌ها به نرم‌افزارهای تخصصی‌تر انجام شود و به شناسایی فایل‌های نامناسب، اشباع‌شده، بسیار کم‌دامنه یا دارای نویز تجهیزات کمک کند. فایل ثبت‌شده با هیدروفون تنها زمانی می‌تواند برای اندازه‌گیری کمی سطح صوت مورداستفاده قرار گیرد که مشخصات سامانه ثبت، حساسیت هیدروفون، بهره سامانه، تنظیمات ضبط و کالیبراسیون به‌طور مناسب

نسخه رایگان از ویراستاری

در نظر گرفته شوند [۲۸,۱۱]. بنابراین، نمایش دامنه در Audacity به‌تنهایی نباید به‌عنوان اندازه‌گیری سطح مطلق فشار صوت تفسیر شود.

۳-۲. شناسایی مقدماتی اجزای سیمای صوتی

سیمای صوتی یک محیط می‌تواند شامل اصوات تولیدشده توسط موجودات زنده، اصوات طبیعی غیرزیستی و اصوات ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد [۱]. در محیط‌های آبی، اصوات ماهیان، سخت‌پوستان و سایر جانوران می‌توانند بخشی از مؤلفه زیستی باشند. جریان آب، بارش و حرکت رسوبات نمونه‌هایی از منابع طبیعی اصوات هستند. شناورها، موتورهای قایق، تجهیزات صنعتی، عملیات ساخت‌وساز و سامانه‌های مکانیکی می‌توانند مؤلفه انسانی صوت را تشکیل دهند [۲,۲۲-۲۳].

مشاهده طیف‌نگاره همراه با گوش‌دادن به فایل می‌تواند برای طبقه‌بندی مقدماتی چنین رویدادهایی مفید باشد. شناسایی گونه یا منبع صوتی صرفاً بر اساس شکل ظاهری طیف‌نگاره نباید قطعی تلقی شود. تأیید منبع ممکن است به مشاهده هم‌زمان جانور، ویدئو، ثبت شرایط محیطی، مقایسه با کتابخانه‌های صوتی معتبر یا روش‌های تجربی مستقل نیاز داشته باشد [۲۳-۲۴,۱۹].

۳-۳. Audacity در گردش کار پایش صوتی غیرفعال

پایش صوتی غیرفعال امکان ثبت غیرتهاجمی محیط صوتی در بازه‌های زمانی طولانی را فراهم می‌کند و می‌تواند برای مطالعه الگوهای روزانه و فصلی، حضور گونه‌های تولیدکننده صوت و تغییرات مرتبط با فعالیت‌های انسانی استفاده شود [۲۲-۲۴]. حجم داده‌های حاصل از چنین پایشی ممکن است بسیار زیاد باشد و در پروژه‌های بلندمدت معمولاً به ابزارهای خودکار یا نیمه‌خودکار برای تحلیل نیاز است.

Audacity برای پردازش خودکار مجموعه‌های بسیار بزرگ داده طراحی نشده است، اما می‌تواند در مرحله کنترل کیفیت و برچسب‌گذاری دستی مفید باشد. برای مثال، پژوهشگر می‌تواند مجموعه‌ای از فایل‌ها یا نمونه‌های زمانی انتخاب‌شده را مشاهده کند، رویدادهای موردنظر را برچسب بزند و اطلاعات برچسب‌ها را برای تحلیل آماری یا توسعه مجموعه‌های آموزشی استخراج کند. چنین فرایندی می‌تواند به ایجاد مجموعه داده مرجع برای ارزیابی روش‌های خودکار تشخیص و طبقه‌بندی صوت کمک کند.

۳-۴. کتابخانه‌های صوتی و شناسایی منابع

کتابخانه‌ها و آرشیوهای صوتی عمومی می‌توانند به‌عنوان منابع مرجع برای مقایسه مقدماتی رویدادهای ثبت‌شده با نمونه‌های صوتی شناخته‌شده مورداستفاده قرار گیرند. در استفاده پژوهشی از این منابع، توجه به فراداده‌هایی مانند گونه، محل و زمان ثبت، شرایط محیطی، سامانه ضبط و تنظیمات ثبت اهمیت دارد؛ زیرا تفاوت در این عوامل می‌تواند بر ویژگی‌های زمانی و بسامدی سیگنال اثر بگذارد. کتابخانه‌های صوتی معرفی‌شده پیش‌تر در این مقاله، علاوه بر فراهم‌کردن نمونه‌های آموزشی برای کار باAudacity ، می‌توانند برای آشنایی با تنوع ساختار صوتی گونه‌ها و منابع مختلف و مقایسه مقدماتی رویدادهای ناشناخته مفید باشند.

نسخه قبل از ویراستاری

بااین‌حال، تطابق شنیداری یا شباهت شکل موج و طیف‌نگاره با یک نمونه موجود در کتابخانه به‌تنهایی برای شناسایی قطعی گونه یا منبع صوتی کافی نیست و در صورت امکان باید با اطلاعات مستقل مانند مشاهده جانور، ویدئو، شرایط محیطی یا سایر شواهد زیستی تأیید شود Audacity .می‌تواند در این فرایند برای مشاهده، انتخاب، برچسب‌گذاری و مقایسه مقدماتی نمونه‌های صوتی به کار رود؛ ضمن آنکه فایل اصلی و فراداده مرتبط باید بدون تغییر حفظ شوند.

۳-۵. حدود کاربرد در تحلیل سیمای صوتی

کاربرد Audacity در زیست‌صوتیات آبزیان باید عمدتاً به‌عنوان یک ابزار آموزشی، بازبینی و پردازش مقدماتی در نظر گرفته شود. برای محاسبه شاخص‌های سیمای صوتی، تحلیل مجموعه‌های طولانی‌مدت، تشخیص خودکار گونه‌ها، تحلیل آماری گسترده یا تولید اندازه‌گیری‌های کالیبره‌شده، معمولاً استفاده از نرم‌افزارها و محیط‌های تحلیلی تخصصی‌تر ضروری است [۲۴,۱۱]. ارزش اصلی Audacity در این حوزه ایجاد یک مرحله ساده و قابل‌دسترس میان ثبت صوت در میدان و تحلیل تخصصی داده‌ها است. استفاده صحیح از آن می‌تواند به آموزش دانشجویان، کنترل کیفیت فایل‌ها، شناسایی مقدماتی رویدادها، برچسب‌گذاری و آماده‌سازی داده برای مراحل پیشرفته‌تر زیست‌صوتیات و پایش صوتی کمک کند.

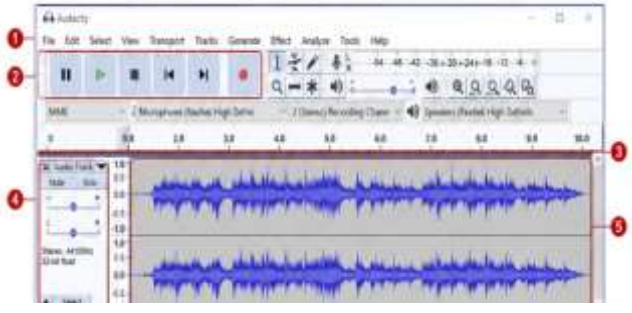
۴. معرفی نرم‌افزار Audacity و محیط کار

ساختار نرم‌افزار Audacity بر پایه پروژه[۱۷] و مسیر صوتی[۱۸] است؛ به این معنا که یک پروژه می‌تواند شامل یک یا چند مسیر صوتی باشد و کاربر می‌تواند هر مسیر را به‌طور مستقل مشاهده، انتخاب و ویرایش کند [۳۰-۲۹]. این ساختار برای آموزش و بررسی مقدماتی داده‌های زیست‌صوتی مناسب است، زیرا فایل‌های مختلف یا بخش‌های متفاوت یک مجموعه داده را می‌توان در یک محیط مشترک مشاهده کرد.

۴-۱. اجزای اصلی محیط نرم‌افزار

پنجره اصلی Audacity شامل نوارهای منو، مجموعه‌ای از نوارابزارها، ناحیه نمایش مسیرهای صوتی و خط زمانی است (شکل ۲). نوارابزار کنترل پخش و ضبط[۱۹] ابزارهای اصلی برای پخش، توقف و ضبط‌صوت را در اختیار کاربر قرار می‌دهد [۳۱]. بخش نمایش مسیر صوتی نیز شکل موج یا سایر حالت‌های نمایش صوت را همراه با محور زمانی نشان می‌دهد. هرمسیرصوتی دارای یک بخش کنترل اختصاصی است که امکان مدیریت ویژگی‌های همان مسیر صوتی را فراهم می‌کند [۳۰].

برای استفاده پژوهشی، مهم‌ترین اجزای محیط نرم‌افزار شامل خط زمانی، نمایش سیگنال، ابزار انتخاب، کنترل‌های پخش و ناحیه مربوط به تنظیمات مسیر صوتی هستند. آشنایی با این اجزا پیش از ورود به تحلیل طیف‌نگاره یا پردازش سیگنال، احتمال خطا در انتخاب بازه‌های زمانی و مدیریت داده‌ها را کاهش می‌دهد.



شکل ۲. نمای محیط نرم‌افزار Audacity و اجزای اصلی آن. نوار منو (۱) ابزارهای کنترل پخش و ضبط (۲)، خط زمانی (۳)، پنل کنترل مسیر صوتی (۴) و مسیر صوتی(۵).

۴-۲ ورود فایل صوتی

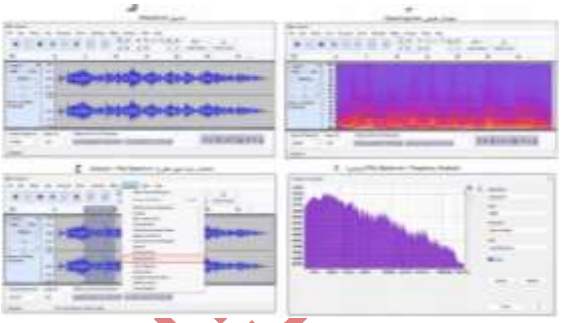
نسخه قبل از ویراستاری

فایل‌های صوتی موجود را می‌توان وارد پروژه کرد یا آن‌ها را مستقیماً به پنجره پروژه کشید [۳۲]. هنگام واردکردن یک فایل صوتی، Audacity یک مسیر صوتی جدید ایجاد می‌کند [۳۰]. این قابلیت برای داده‌های ثبت‌شده با هیدروفون یا ضبط‌کننده‌های میدانی اهمیت دارد. پژوهشگر می‌تواند فایل خام را وارد کرده و پیش از هرگونه پردازش، ساختار زمانی و کیفیت اولیه آن را بررسی کند (شکل ۳). Audacity از قالب‌های رایج صوتی پشتیبانی می‌کند [۳۲]. معمولاً فایل اصلی صوتی و غیرفشرده ثبت‌شده، در قالبWAV، برای آرشیو، تحلیل و پردازش‌ها استفاده می‌شود.

شکل ۳. نمای محیط نرم‌افزار Audacity بعد از ورود یک فایل صوتی شامل طیف نگاره (بالا) و شکل موج (پایین)، (اقتباس از امینی فرد و همکاران در دست چاپ).

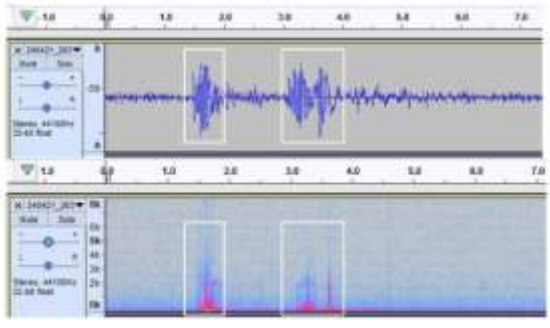
۴-۳ انتخاب و بازبینی صوت

برای انتخاب یک بخش از فایل صوتی، در مسیر صوتی روی نقطه موردنظر کلیک کرده و با کشیدن نشانگر، یک بازه زمانی را مشخص کند [۳۳]. سپس همان بازه را می‌توان پخش، بزرگ‌نمایی، برچسب‌گذاری یا برای بررسی‌های بعدی انتخاب کرد (شکل ۴). این قابلیت پایه‌ای در مطالعات زیست‌صوتی اهمیت زیادی دارد، زیرا بسیاری از مراحل بعدی، از مشاهده طیف تا شناسایی و اندازه‌گیری یک رویداد صوتی (شکل ۵)، بر اساس انتخاب صحیح بازه موردنظر انجام می‌شوند.



موج و طیف نگاره منبع صوتی در یک استخر منطقه معتدله استان گیلان (اقتباس از

شکل ۴. شماتیک تحلیل داده‌های صوتی در نرم‌افزار Audacity .(الف) نمای شکل موج؛ (ب) نمای طیف‌نگاره؛ (ج) انتخاب بازه موردنظر و (د) Spectrum/Frequency Analysis که دامنه را برحسب بسامد نمایش می‌دهد.



شکل ۵. نمای شماتیک شکل [۳۴]).

۴- ۴ پروژه و فایل خروجی

باید میان پروژه و فایل صوتی خروجی[۲۰] تمایز قائل شد. کار در محیط پروژه برای حفظ ساختار ویرایشی انجام می‌شود، درحالی‌که برای تولید یک فایل صوتی مستقل باید از فرمان فایل صوتی خروجی استفاده کرد [۳۵]. هنگام خروجی‌گرفتن، کاربر می‌تواند محل ذخیره، نام فایل، قالب و برخی تنظیمات رمزگذاری را تعیین کند [۳۵].

در مطالعات علمی توصیه می‌شود فایل خام ثبت‌شده بدون تغییر حفظ شود و نسخه‌های پردازش‌شده با نام، تاریخ و توضیحات مناسب به‌صورت جداگانه ذخیره شوند. این روش، قابلیت ردیابی مراحل پردازش و بازتولید تحلیل را افزایش می‌دهد و از تغییر ناخواسته داده اصلی جلوگیری می‌کند.

نسخهٔ قبل از نشاری

۵. مشاهده و بررسی داده‌های صوتی در Audacity

یکی از مهم‌ترین کاربردهای Audacity در مطالعات مقدماتی آکوستیکی، امکان مشاهده سیگنال صوتی از بعدهای زمانی و بسامدی است. بررسی اولیه فایل پیش از انجام هرگونه پردازش می‌تواند اطلاعاتی درباره کیفیت ضبط، مدت و موقعیت رویدادهای صوتی، تغییرات دامنه، محدوده بسامدی و وجود سیگنال‌های ناخواسته فراهم کند. دو ابزار اصلی برای این منظور عبارت‌اند از شکل موج و طیف نگاره که هر یک جنبه متفاوتی از سیگنال را نمایش می‌دهند [۸,۹-۱۱].

۵-۱. بررسی سیگنال در نمای شکل موج

نمای شکل موج تغییرات دامنه نسبی سیگنال را در طول زمان نشان می‌دهد و برای مشاهده ساختار زمانی فایل مناسب است (شکل ۲). با استفاده از این نمایش می‌توان رویدادهای کوتاه یا بلند، فواصل سکوت، تغییرات ناگهانی دامنه و برخی موارد احتمالی برش یا اشباع سیگنال را شناسایی کرد. بزرگ‌نمایی بخش موردنظر نیز امکان بررسی دقیق‌تر زمان شروع و پایان یک رویداد را فراهم می‌کند.

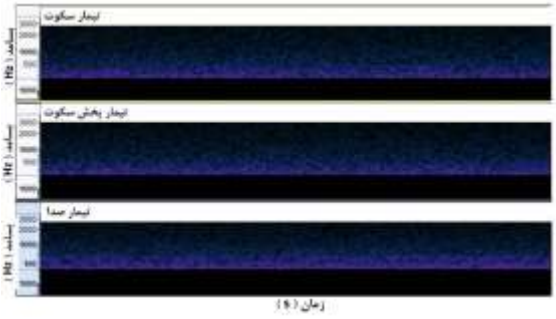
در مطالعات زیست‌صوتیات، شکل موج می‌تواند نخستین مرحله بازبینی یک فایل ضبط‌شده با هیدروفون باشد. بااین‌حال، دامنه نمایش‌داده‌شده در شکل موج معمولاً یک مقدار دیجیتال نسبی است و بدون اطلاعات کالیبراسیون نباید مستقیماً به‌عنوان سطح فشار صوت در محیط تفسیر شود. بنابراین، کاربرد اصلی این نما در Audacity مشاهده ساختار زمانی و مقایسه نسبی بخش‌های یک فایل است.

۵-۲. مشاهده سیگنال در نمای طیف‌نگاره

برای بررسی محتوای بسامدی، مسیر صوت را می‌توان از حالت شکل موج به طیف نگاره تغییر داد. طیف‌نگاره نشان می‌دهد انرژی اجزای مختلف بسامدی چگونه در طول زمان تغییر می‌کند [۸]. در این نمایش، محور افقی زمان، محور عمودی بسامد و شدت نمایش معمولاً بیانگر قدرت نسبی اجزای بسامدی است (شکل ۶).

این نمایش برای مطالعات زیست‌صوتی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بسیاری از رویدادهایی که در شکل موج به‌راحتی قابل‌تفکیک نیستند، در طیف‌نگاره ساختار مشخص‌تری دارند (شکل ۳). برای مثال، اصوات کوتاه جانوری، سیگنال‌های تونال، پهن‌باند، هارمونیک‌ها و برخی اصوات ناشی از فعالیت‌های انسانی ممکن است الگوهای زمانی-بسامدی متفاوتی ایجاد کنند. Audacity همچنین امکان استفاده از نمای چندگانه[۲۱] را فراهم می‌کند که در آن شکل موج و طیف نگاره یک فایل به‌طور هم‌زمان نمایش داده می‌شوند [۳۶]. این حالت برای مقایسه ساختار زمانی و بسامدی یک رویداد مفید است (شکل ۵).

شکل ۶. نمای شماتیک طیف نگاره در تیمارهای مختلف صوتی مطالعه آزمایشگاهی (اقتباس از [۳۷])



۶. انتخاب، برچسب‌گذاری و مدیریت رویدادهای صوتی

نسخه قبل از ویراستاری

پس از مشاهده اولیه شکل موج و طیف‌نگاره، یکی از مراحل مهم در بررسی داده‌های زیست‌صوتی، شناسایی و ثبت رویدادهای صوتی است. Audacity امکان انتخاب دقیق بخش‌های موردنظر و ایجاد مسیرهای برچسب را فراهم می‌کند. این قابلیت می‌تواند برای مشخص‌کردن زمان وقوع اصوات جانوری، فعالیت‌های انسانی، اصوات طبیعی یا رویدادهای ناشناخته و سازمان‌دهی داده‌ها برای تحلیل‌های بعدی مورداستفاده قرار گیرد [۳۸-۳۹,۱۲,۱۰].

۶-۱. ایجاد و نام‌گذاری برچسب‌ها

با توجه به شکل ۷، Audacity دو نوع اصلی برچسب را پشتیبانی می‌کند که شامل برچسب نقطه‌ای[۲۲] برای مشخص‌کردن یک نقطه زمانی و برچسب ناحیه‌ای[۲۳] برای مشخص‌کردن یک بازه زمانی است [۱۰]. برای کاربرد پژوهشی، نام‌گذاری برچسب‌ها بهتر است بر اساس یک نظام استاندارد انجام شود. برای مثال، می‌توان از شناسه‌هایی مانند Fish_call، Boat، Rain، Unknown_01 یا کدهای از پیش تعریف‌شده استفاده کرد. استفاده مداوم از شناسه‌ها و کدهای کنترل‌شده احتمال خطا در مرحله طبقه‌بندی و تحلیل داده‌ها را کاهش می‌دهد.

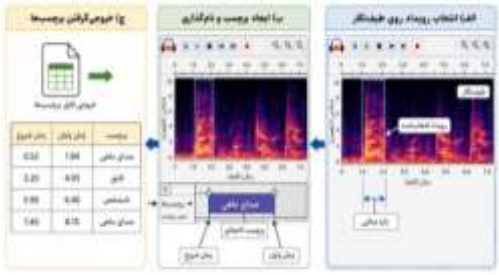
۶-۲. ثبت زمان و محدوده بسامدی

هر برچسب ناحیه‌ای می‌تواند زمان شروع و پایان یک رویداد را ثبت کند. در صورت استفاده از انتخاب طیفی، Audacity همچنین امکان ذخیره محدوده بسامدی همراه با برچسب را در قالب توسعه‌یافته فایل برچسب فراهم می‌کند [۱۲]. این قابلیت می‌تواند برای رویدادهایی که علاوه بر مدت‌زمان، محدوده بسامدی مشخصی دارند مفید باشد. بااین‌حال، مقادیر بسامدی ثبت‌شده از روی طیف نگاره به تنظیمات نمایش، وضوح زمانی-بسامدی و نسبت سیگنال به نویز وابسته‌اند. بنابراین، چنین مقادیری باید به‌عنوان بخشی از فرایند نشانه‌گذاری[۲۴] سیگنال تفسیر شوند و در صورت نیاز به اندازه‌گیری دقیق بسامد، با روش‌های تحلیلی مناسب تأیید شوند.

۶-۳. مدیریت و خروجی‌گرفتن برچسب‌ها

ویرایشگر برچسب در Audacity برچسب‌های پروژه را به‌صورت جدولی نمایش می‌دهد و امکان مشاهده و ویرایش مجموعه برچسب‌ها را فراهم می‌کند [۳۹]. این قابلیت در فایل‌هایی با تعداد زیاد رویداد مفید است. از مهم‌ترین مزایای استفاده از مسیر برچسب[۲۵] برای پژوهش، امکان خروجی گرفتن برچسب‌ها[۲۶] است. برچسب‌ها را می‌توان در قالب فایل متنی جداشده ذخیره کرد. در حالت استاندارد، هر ردیف شامل زمان شروع، زمان پایان و نام برچسب است [۴۰,۱۲-۳۹]. چنین فایلی را می‌توان در صفحه‌گسترده‌ها یا نرم‌افزارهای آماری وارد کرد و برای محاسبه تعداد رویدادها، مدت آن‌ها، نرخ وقوع یا سایر شاخص‌ها به کار برد. در مطالعات زیست‌صوتی توصیه می‌شود فایل صوتی خام، پروژه Audacity و فایل برچسب‌ها به‌صورت جداگانه و با شناسه مشترک نگهداری شوند. این ساختار، ردیابی رویدادهای صوتی، کنترل کیفیت فرایند نشانه‌گذاری و بازتولید مراحل تحلیل را تسهیل می‌کند.

نسخه قبل از ویراستاری



شکل ۷. تصویر شماتیک در Audacity . (الف) انتخاب یک رویداد روی نمای طیف‌نگاره؛ (ب) ایجاد برچسب و نام‌گذاری و ثبت بازه زمانی رویداد؛ و (ج) نمونه‌ای از خروجی گرفتن برچسب‌ها شامل زمان شروع، زمان پایان و عنوان برچسب‌ها.

۷. ابزارهای پردازش فایل‌های صوتی

Audacity مجموعه‌ای از ابزارهای ویرایش و پردازش را برای آماده‌سازی فایل‌های صوتی فراهم می‌کند. این امکانات می‌توانند برای جداسازی بخش‌های موردنظر، تنظیم دامنه، کاهش برخی نویزهای ناخواسته و تهیه نسخه‌های مناسب برای آموزش، شنیدن یا بررسی مقدماتی مفید باشند. بااین‌حال، در مطالعات زیست‌صوتیات و بوم صوتیات باید میان آماده‌سازی فایل برای مشاهده و شنیدن و پردازش داده برای اندازه‌گیری کمی تمایز قائل شد. هرگونه تغییر در دامنه، محتوای بسامدی یا ساختار زمانی ممکن است ویژگی‌های سیگنال اصلی را تغییر دهد. ازاین‌رو، فایل خام باید همواره بدون تغییر نگهداری شود و تمامی مراحل پردازش مستندسازی شوند.

۷-۱. برش و نگه‌داشتن بخش‌های موردنظر

برای برش[۲۷] و نگه‌داشتن بخش‌های انتخاب‌شده[۲۸] از یک رویداد یا بازه زمانی مشخص استفاده می‌شوند. فرمان برش بخش انتخاب‌شده را حذف و به حافظه موقت منتقل می‌کند، درحالی‌که فرمان نگه‌داشتن بخش‌های انتخاب‌شده بخش موردنظر صوتی را حفظ و قسمت‌های خارج از آن را از محدوده قابل پخش یا خروجی کنار می‌گذارد [۴۱]. این ابزارها برای تهیه کلیپ‌های کوتاه از رویدادهای زیست‌صوتی یا استخراج نمونه‌های آموزشی کاربرد دارند [۳۴]. در مطالعات پژوهشی بهتر است فایل اصلی مستقیماً برش داده نشود. به این منظور نسخه‌ای از فایل برای ویرایش ایجاد شود و شناسه فایل، زمان شروع و پایان کلیپ و ارتباط آن با فایل خام در فرادادهٔ ثبت گردد.

۷-۲. تغییر دامنه با Amplify

در Audacity، فرایند تغییر دامنه و تقویت[۲۹] امکان افزایش یا کاهش دامنه بخش انتخاب‌شده از سیگنال را با یک ضریب مشخص فراهم می کند. در صورت جلوگیری از برش دامنه صوت[۳۰] شکل زمانی سیگنال و توزیع نسبی مولفه های بسامدی حفظ می شوند [۴۲]. مقدار تقویت برحسب دسی‌بل تعیین می‌شود و مقادیر مثبت دامنه را افزایش و مقادیر منفی آن را کاهش می‌دهند. هنگام اعمال تقویت به چند مسیر صوتی، مقدار تغییر برای همه آن‌ها یکسان است و بنابراین اختلاف نسبی سطح میان مسیرهای صوتی حفظ می‌شود [۴۲]. در داده‌های زیست‌صوتی، فرایند تقویت می‌تواند برای افزایش قابلیت شنیدن یا نمایش یک سیگنال ضعیف در نسخه آموزشی مفید باشد (شکل ۵). البته، اندازه‌گیری کمی دامنه یا تراز صوت بهتر است روی‌داده خام یا بر اساس یک زنجیره پردازش از پیش تعریف‌شده و کالیبره انجام شود.

۷-۳ نرمال‌سازی[۳۱] صوت

نسخه قبل از ویراستاری

نرمال‌سازی صوت می‌تواند بیشینه دامنه یک مسیر صوتی یا انتخاب را به مقدار مشخصی تنظیم کند [۴۳]. تفاوت مهم آن با تقویت این است که در نرمال‌سازی چند مسیر صوتی، هر مسیر صوتی می‌تواند به‌طور مستقل به سطح هدف تنظیم شود، درحالی‌که تقویت یک مقدار تغییر یکسان را به مسیرهای صوتی انتخاب‌شده اعمال می‌کند [۴۲,۴۳].

نرمال‌سازی برای یکسان‌سازی سطح نمونه‌های صوتی در کاربردهای آموزشی یا ارائه صوتی مفید است، اما اگر هدف مطالعه مقایسه دامنه نسبی یا شدت رویدادها باشد، نرمال‌سازی می‌تواند اطلاعات موردنظر را تغییر دهد و نباید پیش از تحلیل کمی بدون توجیه روش‌شناختی اعمال شود.

۷-۴ فیلترگذاری بسامدی[۳۲]

فیلترگذاری بسامدی امکان افزایش یا کاهش دامنه محدوده‌های انتخابی بسامدی را فراهم می‌کند و بر پایه پردازش حوزه بسامد عمل می‌کند [۴۴]. از چنین فیلترهایی می‌توان برای کاهش مؤلفه‌های ناخواسته یا برجسته‌سازی محدوده‌ای خاص در نسخه‌های شنیداری و آموزشی استفاده کرد.

فیلترگذاری مستقیماً ساختار طیفی سیگنال را تغییر می‌دهد. بنابراین، در مطالعاتی که بسامد غالب، پهنای باند، انرژی طیفی یا سایر ویژگی‌های بسامدی اندازه‌گیری می‌شوند، استفاده از فیلتر باید از قبل تعریف، گزارش و ازنظر تأثیر احتمالی بر متغیر موردنظر اندازه‌گیری ارزیابی شود.

۷-۵ کاهش نویز[۳۳]

این قابلیت برای کاهش نویزهای نسبتاً پایدار یا برخی اصوات زمینه ثابت طراحی‌شده است [۴۵]. این روش ابتدا به یک بخش حاوی عمدتاً نویز نیاز دارد تا نمایه نویز[۳۴] از آن تهیه شود و سپس کاهش نویز روی بخش انتخاب‌شده اعمال می‌شود [۴۵]. کاهش نویز باید در داده‌های زیست‌صوتی بااحتیاط زیادی استفاده شود. اگر طیف نویز با سیگنال جانوری هم‌پوشانی داشته باشد یا تنظیمات بیش‌ازحد شدید باشند، بخشی از سیگنال زیستی نیز ممکن است تغییر کند. بنابراین، برای تحلیل‌های کمی بهتر است ابتدا داده خام بررسی شود و نسخه پردازش‌شده تنها زمانی استفاده شود که روش، پارامترها و هدف پردازش به‌طور شفاف گزارش‌شده باشند.

درمجموع، ابزارهای پردازش Audacity برای آماده‌سازی، آموزش و بررسی اولیه بسیار مفیدند، اما اصل اساسی در کاربرد پژوهشی، حفظ فایل خام، ایجاد نسخه پردازش‌شده جداگانه و ثبت کامل تمام تغییرات انجام‌شده است.

شکل ۸. تصویر شماتیک ابزارهای پردازش فایل صوتی در Audacity . (الف) سیگنال خام/اصلی و انتخاب بخش موردنظر؛ (ب) تقویت و نرمال‌سازی؛ (ج) فیلترگذاری بسامدی و (د) کاهش نویز.

۸ گردش‌کار پیشنهادی برای بررسی داده‌های زیست‌صوتی در Audacity

برای استفاده منظم و تکرارپذیر از Audacity در مطالعات زیست‌صوتیات آبزیان، بوم صوتیات و ارزیابی سیمای صوتی اکوسیستم‌های آبی بهتر است مراحل بررسی فایل‌های صوتی در قالب یک گردش‌کار استاندارد انجام شوند (شکل ۹). هدف این گردش‌کار، حفظ فایل خام، کاهش خطاهای پردازشی، ثبت اطلاعات ضروری و آماده‌سازی داده‌ها برای تحلیل‌های تخصصی‌تر است.

نسخه قبل از ویراستاری

۸-۱ حفظ و سازمان‌دهی فایل خام

در نخستین مرحله، فایل اصلی ثبت‌شده با هیدروفون یا ضبط‌کننده باید بدون تغییر آرشیو شود. توصیه می‌شود نام فایل شامل شناسه محل، ایستگاه، تاریخ، زمان یا شماره ضبط باشد و اطلاعاتی مانند نرخ نمونه‌برداری، عمق بیت، مدل هیدروفون، حساسیت حسگر، تنظیمات بهره و شرایط محیطی در فراداده ثبت شوند [۱۱,۲۱] هرگونه ویرایش باید روی نسخه‌ای جداگانه انجام شود.

۸-۲ کنترل کیفیت اولیه

فایل صوتی در Audacity واردشده و ابتدا در نمای شکل موج و سپس طیف نگاره بررسی می‌شود. در این مرحله می‌توان وجود برش سیگنال، سکوت‌های غیرعادی، نویز تجهیزات، تغییرات ناگهانی دامنه، قطعی ضبط یا سایر مشکلات احتمالی را شناسایی کرد. در صورت نیاز، بخش‌های نامناسب باید مشخص شوند، اما فایل خام نباید حذف یا بازنویسی شود.

۸-۳ مشاهده و شناسایی رویدادها

پس از کنترل کیفیت، بخش‌های موردنظر با استفاده از شکل موج، طیف نگاره بررسی می‌شوند. رویدادها می‌توانند به‌صورت مقدماتی در گروه‌های زیستی، طبیعی غیرزیستی، انسانی یا ناشناخته طبقه‌بندی شوند [۱,۲]. در این مرحله، شنیدن فایل باید همراه با مشاهده ساختار زمانی-بسامدی انجام شود و شناسایی گونه یا منبع تنها در صورت وجود شواهد مستقل قطعی تلقی شود.

۸-۴ برچسب‌گذاری و ثبت فراداده

رویدادهای شناسایی‌شده با استفاده از مسیر برچسب[۳۵] مشخص و زمان شروع، پایان و عنوان آن‌ها ثبت می‌شود. در صورت امکان، اطلاعات مرتبط با ایستگاه، تاریخ، شرایط محیطی و هویت احتمالی منبع نیز باید در فایل فراداده مستقل نگهداری شوند. خروجی مسیر برچسب و نشانه‌گذاری صوتی می‌تواند برای ایجاد جدول رویدادها و انتقال اطلاعات به نرم‌افزارهای آماری استفاده شود.

۸-۵ پردازش و انتقال به تحلیل تخصصی

در صورت نیاز به تهیه کلیپ یا نسخه آموزشی، پردازش‌هایی مانند تقویت، ویرایش یا کاهش نویز باید تنها روی نسخه‌ای جداگانه انجام شوند. برای تحلیل کمی کالیبره‌شده، محاسبه شاخص‌های سیمای صوتی، پردازش مجموعه‌های بزرگ، تشخیص خودکار یا تحلیل آماری پیشرفته، داده‌ها باید به نرم‌افزارها و محیط‌های تخصصی‌تر منتقل شوند. درمجموع، گردش‌کار پیشنهادی را می‌توان به‌صورت شکل زیر خلاصه کرد (شکل۹). این ساختار امکان ردیابی مراحل تحلیل، حفظ داده اصلی و افزایش قابلیت تکرارپذیری پژوهش را فراهم می‌کند.

نسخهٔ ویرایشگاری

شکل ۹ .گردش‌کار پیشنهادی برای بررسی داده‌های زیست‌صوتی در Audacity.

۹ نتیجه‌گیری

Audacity به‌عنوان یک نرم‌افزار رایگان، متن‌باز و نسبتاً ساده، می‌تواند ابزار مناسبی برای آموزش، مشاهده، سازمان‌دهی و پردازش مقدماتی فایل‌های صوتی باشد. قابلیت‌هایی مانند نمایش شکل موج و طیف‌نگاره، بررسی طیف بسامدی، انتخاب و برچسب‌گذاری رویدادها، مدیریت فایل‌ها و انجام برخی پردازش‌های اولیه، امکان آشنایی عملی پژوهشگران با ساختار داده‌های صوتی را فراهم می‌کنند. در مطالعات زیست‌صوتیات آبزیان و سیمای صوتی، Audacity می‌تواند در مراحل اولیه یک گردش‌کار پژوهشی شامل کنترل کیفیت فایل‌های ثبت‌شده با هیدروفون، شناسایی مقدماتی رویدادهای زیستی، طبیعی و انسانی، نشانه‌گذاری صوتی و آماده‌سازی داده‌ها برای تحلیل‌های تخصصی‌تر مورداستفاده قرار گیرد. بااین‌حال، این نرم‌افزار جایگزین سامانه‌های تخصصی اندازه‌گیری و تحلیل

نسخهٔ قبل از ویرایش و صفحه‌آرایی

آکوستیکی نیست. اندازه‌گیری سطح فشار صوت کالیبره‌شده، ارزیابی حرکت ذره‌ای، پردازش خودکار مجموعه‌های بزرگ داده، تشخیص خودکار گونه‌ها و تحلیل‌های پیشرفته نیازمند تجهیزات، نرم‌افزارها و روش‌های تخصصی‌تر هستند. در آینده، توسعه منابع آموزشی فارسی، استفاده از نمونه‌های واقعی ثبت‌شده در محیط‌های آبی، ایجاد کتابخانه‌های صوتی منطقه‌ای و تلفیق آموزش Audacity با نرم‌افزارهای تخصصی می‌تواند به گسترش ظرفیت آموزشی و پژوهشی زیست‌صوتیات آبزیان و مطالعات سیمای صوتی کمک کند.

۱۰. قدردانی

نویسندگان از نظرهای مفید و ارزشمند سردبیر، ویراستاران و داوران محترم که موجب بهبود کیفیت علمی و ادبی مقاله شد، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین از همکاری علمی سرکار خانم فاطمه علیزاده لادمخی و سرکار خانم زهرا سمندر در فعالیت‌های پژوهشی مرتبط قدردانی می‌شود . این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۳۷۳۹۷" انجام شده است.

۱۱. منابع

[1] 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.

[2] 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. doi: 10.1098/rsos.201287. PMID: 32968541; PMCID: PMC7481698.

[3] Bahraini Motlagh, M., Rouzbehani, R., Eftekhari, M., & Hassanli, S. A. M. (2019). Survey of acoustic technologies for flow monitoring in rivers. *Journal of Vibration and Sound*, 8(15), 73–82.

[4] Bahreini Motlagh, M. Roozbahani, R., Eftekhari, M., & Sadeshi Deloei, M. (2022). Application of Acoustic Tomography method to oceanographic studies. *Journal of Vibration and Sound*, *10*(20), 133-143.

[5] 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. 10.22034/ijcoe.2023.166732.

[6] Farokhnia, A., Hosseinzadeh Asl, R., Eskandari, A., & Bahreini Motlagh, M. (2026). Development of an Algorithm for Measuring Vertical Profile of Sound Speed in Water Bodies using Acoustic Tomography Technology. *Journal of Vibration and Sound*, 15(29), 48-64.

[7] Audacity Team. *Audacity: Free, Open-Source, Multi-Track Audio Editor and Recorder*. Audacity, 2026. https://www.audacityteam.org/

[8] Audacity Team. *Spectrogram View*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/spectrogram_view.html

[9] Audacity Team. *Plot Spectrum*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/plot_spectrum.html

نسخهٔ قبل از ویراستاری

[10] Audacity Team. *Label Tracks*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/label_tracks.html
[11] Audacity Team. *Spectrogram Settings*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/spectrogram_settings.html
[12] Audacity Team. *Importing and Exporting Labels*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/importing_and_exporting_labels.html
[13] Audacity Team. *Digital Audio Fundamentals*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/digital_audio.html
[14] Audacity Team. *Audacity Waveform*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/audacity_waveform.html
[15] Audacity Team. *Sample Rates*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/sample_rates.html
[16] Audacity Team. *Sample Format – Bit Depth*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/sample_format_bit_depth.html
[17] Nordeide, J. T., & Finstad, J. L. (2002). Is acoustic calls a premating reproductive barrier between two northeast Atlantic cod (*Gadus morhua*) groups—a review. *Listening to Fish*.
[18] Looby, A., Vela, S., Cox, K., Riera, A., Davies, H. L., Spriel, B., Murchy, K., Bravo, S., Rountree, R., Juanes, F., Reynolds, L. K., & Martin, C. W. (2026). *FishSounds*. Version 2026-Apr. https://fishsounds.net/
[19] Greenhalgh, J. A., Akmentins, M. S., Boullhesen, M., Brejão, G. L., Bowman, J. C., Briers, R. A., et al. (2025). The Freshwater Sounds Archive. *bioRxiv*. https://doi.org/10.1101/2025.05.07.652412. Napier Repository Access to The Freshwater Sounds Archive
[20] Sayigh, L. S., Daher, M. A., Allen, J., Gordon, H., Joyce, K., Stuhlmann, C., & Tyack, P. (2016). The Watkins Marine Mammal Sound Database: An online, freely accessible resource. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 27, 040013. https://doi.org/10.1121/2.0000358
[21] NOAA National Centers for Environmental Information. (2017). *Passive Acoustic Data Collection*. NOAA National Centers for Environmental Information. https://doi.org/10.25921/PF0H-SQ72. Accessed 6 October 2026.
[22] Linke, S., Gifford, T., Desjonquères, C., Tonolla, D., Aubin, T., Barclay, L., Karaconstantis, C., Kennard, M. J., Rybak, F., & 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
[23] Greenhalgh, J. A., Genner, M. J., Jones, G., & Desjonquères, C. (2020). The role of freshwater bioacoustics in ecological research. *WIREs Water*, **7**(3), e1416. https://doi.org/10.1002/wat2.1416
[24] Ross, S. R. P.-J., O'Connell, D. P., Deichmann, J. L., Desjonquères, C., Gasc, A., Phillips, J. N., Sethi, S. S., Wood, C. M., & Burivalova, Z. (2023). "Passive acoustic monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions." *Functional Ecology*, **37**(4), 959–975. https://doi.org/10.1111/1365-2435.14275
[25] Shafiei Sabet, S. (2021). Sound impacts on the behaviour of zebrafish and Lake Victoria cichlids under laboratory conditions. *Journal of Vibration and Sound*, *10*(19), 96-109.
[26] Mohsenpour, S. R., & Shafiei Sabet, S. (2021). The effect of increased sound levels with different temporal patterns on swimming behaviour of Zebrafish (*Danio rerio*). *Journal of Natural Environment*, *73*(4), 805-818.

نسخه قبل از ویرایش

[27] Shafiei Sabet, S., Neo, Y. Y., & Slabbekoorn, H. (2015). The effect of temporal variation in sound exposure on swimming and foraging behaviour of captive zebrafish. *Animal Behaviour*, *107*, 49-60. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.05.022.
[28] Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. NPL Good Practice Guide No. 133. National Physical Laboratory.
[29] Audacity Team. *Audacity: Free Audio Editor and Recorder*. Audacity. .https://www.audacityteam.org/
[30] Audacity Team. *Audio Tracks*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/audio_tracks.html
[31] Audacity Team. *Transport Toolbar*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/transport_toolbar.html
[32] Audacity Team. *Importing Audio*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/importing_audio.html
[33] Audacity Team. *Selecting Audio*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/audacity_selection.html
[34] Shafiei Sabet, S. (2025). Underwater soundscape analysis in a temperate pond: a case study in Guilan province. *Journal of Acoustical Society of Iran*, *12*(2). http://joasi.ir/article-1-296-en.html.
[35] Audacity Team. *Export Audio*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/file_export_dialog.html
[36] Audacity Team. *Multi-view*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/multi_view.html
[37] Shafiei Sabet, S., Aminifsrd, M., Samandar, Z., & Alizadeh Ladehmakhi, F. (2024). Measurements of ambient and elevated sound levels in an experimental tank. *Journal of Acoustical Society of Iran*, *12*(1), 48-61. http://joasi.ir/article-1-289-en.html.
[38] Audacity Team. *Selection Toolbar*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/selection_toolbar.html
[39] Audacity Team. *Label Editor*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/labels_editor.html
[40] Audacity Team. *File Menu: Export Other – Export Labels*. Audacity Manual.https://manual.audacityteam.org/man/file_menu_export_other.html
[41] Audacity Team. *Audio Clips*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/audacity_tracks_and_clips.html
[42] Audacity Team. *Amplify*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/amplify.html
[43] Audacity Team. *Normalize*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/normalize.html
[44] Audacity Team. *Filter Curve EQ*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/filter_curve_eq.html
[45] Audacity Team. *Noise Reduction*. Audacity Manual. https://manual.audacityteam.org/man/noise_reduction.html

[1] Bioacoustics
2 Ecoacoustics
3 Passive
4 Annotation
[5] Mel-spectrogram

نسخهٔ قبل از ویرایش

[6] Convolutional Neural Network
7 Meta data
8 Time
[9] Amplitude
[10] Frequency
[11] Sample Rate
[12] Bit Depth
[13] Wave form
[14] Spectrogram
[15] Amplitude
[16] Hertz
[17] Project
[18] Audio track
[19] Transport Toolbar
[20] Export audio
[21] Multi-view
[22] Point Label
[23] Region Label
[24] Annotation
[25] Label Track
[26] Export Labels
[27] Cut
[28] Trim
[29] Amplify
[30] Clipping
[31] Normalize
[32] Filter Curve EQ
[33] Noise Reduction
[34] Noise Profile
[35] Label Track

نسخهٔ قبل از ویراستاری