

A Comparison of the Structure of Acoustic Signals of Red-headed Buntings (*Emberiza Melanocephala*) and Black-headed Buntings (*E. Bruniceps*)

Bitá Shams¹, Mohammad Kaboli^{2*}

¹ Ph. D. Student of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Tehran

² Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Tehran

Abstract

Analysis of song structure characteristics in the passeriform can be used as a powerful index in determining the taxonomical status of species of genus or subspecies of a species. Black-headed bunting (*Emberiza melanocephala*) and red-headed bunting (*E. bruniceps*) meet in a hybrid zone southeast of the Caspian Sea, Iran, and produce hybrid bunting individuals. This phenomenon, which creates these hybrid individuals may originate from the fact that there is a high similarity in the male song of the two species which may cause females to make a mistake in identifying the species they choose to mate with. This study was conducted to investigate the similarities and differences of the male songs of these two species by downloading their songs from the open-access online repository Xeno-Canto. Thirty audio files were selected for analysis in the warbleR software. The spectrograms and principal components were extracted according to the offered functions of this package. The Principal Component Analysis (PCA) showed no clustering of signals detected by this technique as well as overlap in some of the sound characteristics of the two species. The results of the present study revealed that despite the evolution of plumage and morphometric differences between the two species, the mechanism of reproductive isolation between them (including the development of acoustic signals to correctly identify males and females of each species and exclude other species individuals) was still incomplete which may cause gene flow and consequently hybridization.

Key words: hybridization, Red-headed Bunting, Black-headed bunting, contact zone, warbleR Package.

* mkaboli@ut.ac.ir

مقایسه ساختار سیگنال‌های صوتی آواز زرده‌پره سرسیاه (*Emberiza melanocephala*) و زرده‌پره سرسرخ (*E. bruniceps*)

بیبا شمس^۱ و محمد کابلی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ساختار آواز در اعضای خانواده گنجشک‌شکلان (Passeriformes) در جایگاه شاخصی قوی برای رده‌بندی گونه‌های یک جنس یا زیرگونه‌های یک گونه استفاده شده است. دو گونه زرده‌پره سرسرخ و زرده‌پره سرسیاه در محل برخورد ثانویه خود در زیستگاه‌های نواحی جنوب شرقی دریای خزر دورگه شده‌اند و افراد حد واسط تولید می‌کنند. بروز این واقعه، احتمال تشابه بسیار زیاد آواز جنس نر در این دو گونه را مطرح می‌کند که سبب می‌شود جنس ماده در تفکیک آواز جنس نر گونه دیگر، دچار خطا شود. این مطالعه با هدف بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌های سیگنال‌های آواز جنس نر در این دو گونه پرنده با استفاده از آوازهای ثبت‌شده در بانک آواز پرندگان (*Xeno-Canto*) انجام شده است. به این منظور تعداد ۳۰ آواز از این دو گونه برای تجزیه و تحلیل در بسته warbler انتخاب و اسپکتروگرام‌ها و مؤلفه‌های اصلی آوازها استخراج شد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)، خوشه‌بندی نشدن سیگنال‌های تشخیص داده‌شده با این تکنیک و هم‌پوشانی زیاد در برخی از ویژگی‌های صوتی این دو گونه را نشان داد. نتایج این بررسی نشان داد با وجود تکامل تفاوت‌های ریختی و رنگ پر و بال در بین این دو گونه، هنوز مکانیزم جدایی زادآوری بین آنها (از جمله تکامل سیگنال‌های صوتی برای تشخیص صحیح نرها و ماده‌های هر گونه و تفکیک افراد سایر گونه‌های دیگر) کامل نشده است که این امر موجب جریان ژن و دورگه‌زایی بین این دو گونه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دورگه‌زایی، زرده‌پره سرسرخ، زرده‌پره سرسیاه، ناحیه تماس، بسته warbler.

مقدمه

موجودات زنده را بررسی می‌کند. تاریخچه توسعه این شاخه از علم به سال ۱۹۵۰ باز می‌گردد؛ زمانی که روش‌های ثبت و تجزیه و تحلیل علمی صوت در دسترس جامعه علمی قرار گرفت. در حال حاضر به

بیوآکوستیک (Bioacoustics) گرایشی بین رشته‌ای در علوم زیستی است که چگونگی تولید صوت، انتشار و تأثیر آن بر شکل‌گیری ارتباطات بین

* mkaboli@ut.ac.ir

Copyright©2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/tbj.2020.121071.1107](https://doi.org/10.22108/tbj.2020.121071.1107)

Slabbekoorn, 2004). سیگنال‌های صوتی مختص هر گونه پرنده، سبب می‌شود تا جنس‌های نر و ماده هر گونه همدیگر را تشخیص بدهند و از جفت شدن با سایر گونه‌ها پرهیز کنند (Martin and Martin, 2001; Slagsvold, *et al.*, 2002; Hansen and Slagsvold, 2003). در بسیاری از پرندگان آوازخوان، ساختار آوازها در مقیاس جغرافیایی خرد و کلان متفاوت است (Mundinger, 1982) و حتی جمعیت‌های مختلف یک گونه در مناطق جغرافیایی مختلف، تا حدی آوازهای مختص به خود را دارند (Catchpole and Slater, 1995)؛ بنابراین سیگنال‌های صوتی در کنار داده‌های مولکولی و ریخت‌شناختی، ابزار قدرتمندی در مطالعات رده‌بندی و رفتارشناسی پرندگان معرفی شده است (Pavan, 2008)؛ همچنین با استفاده از این دانش، کارشناسان اطلاعاتی دقیق در سطح فرد از یک جمعیت استخراج می‌کنند (Pavan, 2008)؛ بنابراین امروزه ادعا می‌شود تنوع صوت‌ها در یک منطقه، شاخص قدرتمندی از تنوع زیستی آن منطقه است (Sueur *et al.*, 2008; Obrist *et al.*, 2010).

صدا شامل امواج نوسان‌کننده‌ای است که با سرعت‌های مختلف (وابسته به دما) از طریق ناقل‌هایی مانند هوا (۳۴۳ متر بر ثانیه در ۲۰ درجه سلسیوس)، آب (۱۴۸۴ متر بر ثانیه در ۲۰ درجه سلسیوس) و زمین (در حدود ۵۰۰۰ متر بر ثانیه بسته به تخلخل محیط) انتشار می‌یابد. تعداد سیکل‌ها در هر ثانیه، فرکانس صدا را نشان می‌دهد و براساس هرتز (Hz) اندازه‌گیری می‌شود. محدوده فرکانس‌های صوتی که در محدوده شنوایی انسان قرار می‌گیرد به‌طور تقریبی از ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز است که به اصطلاح «صدای قابل شنیدن» (Audible sound) نامیده می‌شود؛ اما شنوایی بیشتر

کمک تکنیک‌های جدید، پایش و تجزیه و تحلیل صوت‌های جانوران از جمله پرندگان، حشرات، دوزیستان، خفاش‌ها و وال‌ها انجام می‌شود (Pavan, 2008). از حدود پنج دهه گذشته، ارتباطات صوتی حیوانات یکی از زمینه‌های پژوهشی جذاب در زیست‌شناسی تکاملی و رفتاری بوده است (Bradbury and Vehrencamp, 2011)؛ برای مثال شناسایی گونه‌ها، تخمین فراوانی و همچنین ارزیابی رفتار جانوران براساس سیگنال‌های صوتی از جمله زمینه‌های مطالعاتی در این شاخه از علم است (Obrist *et al.*, 2010). دانشگاه Cornell آمریکا با داشتن برنامه تحقیقاتی بیواکوستیک (Bioacoustics Research Program) در این عرصه پیشگام و مأموریت این برنامه، جمع‌آوری و تفسیر صوت‌ها در طبیعت با استفاده از فن‌آوری‌های نوین در مقیاس‌های مختلف بوم‌شناختی به منظور استفاده از نتایج آن برای حفاظت از حیات وحش و زیستگاهها بوده است (<http://www.birds.cornell.edu/brp/>).

سیگنال‌های صوتی بسیاری از عملکردهای رفتاری مهم در جانوران از جمله انتخاب جفت (Price, 2008)، برقراری ارتباط (Obrist *et al.*, 2010)، دفاع از قلمرو (Price, 2008)، جهت‌یابی (Obrist *et al.*, 2010) و تشخیص افراد هم‌گونه (Price, 2008) را کنترل می‌کند (Obrist *et al.*, 2010). آوازخوانی در پرندگان، سیگنالی جنسی است که در جذب جفت نقش مهمی را ایفا می‌کند (Catchpole and Salter, 1995; Searcy and Yasukawa, 1996). سیگنال‌های صوتی عاملی مهم در ایجاد جدایی تولید مثل بین پرندگان آوازخوان (از راسته گنجشک‌شکلان) در زمان جفت‌یابی است (Catchpole and Salter, 1995; Marler and)

حیوانات در حد پایین تر یا بالاتر از محدوده شنوایی انسان قرار دارد. سیگنال‌های که زیردامنه شنوایی انسان هستند، مادون صوت (Infrasound) نامیده می‌شوند و برای ثبت آن نیاز به تجهیزات ویژه است. امواج مادون صوت فواصل زیادی را طی می‌کنند و برای لرزه‌نگاری یا رخدادهای آب و هوایی مناسب‌اند. این دسته از صوت‌ها را برخی گونه‌ها از جمله فیل و نهنگ به‌منظور برقراری ارتباط بین افراد گله استفاده می‌کنند (Garstang, 2004)؛ همین‌طور سیگنال‌های صوتی که در بالاتر از محدوده شنوایی انسان باشد را ماوراء صوت (Ultrasound) می‌نامند که توسط برخی جانوران از جمله خفاش و دلفین برای موقعیت‌یابی استفاده می‌شود (Obrist et al., 2010).

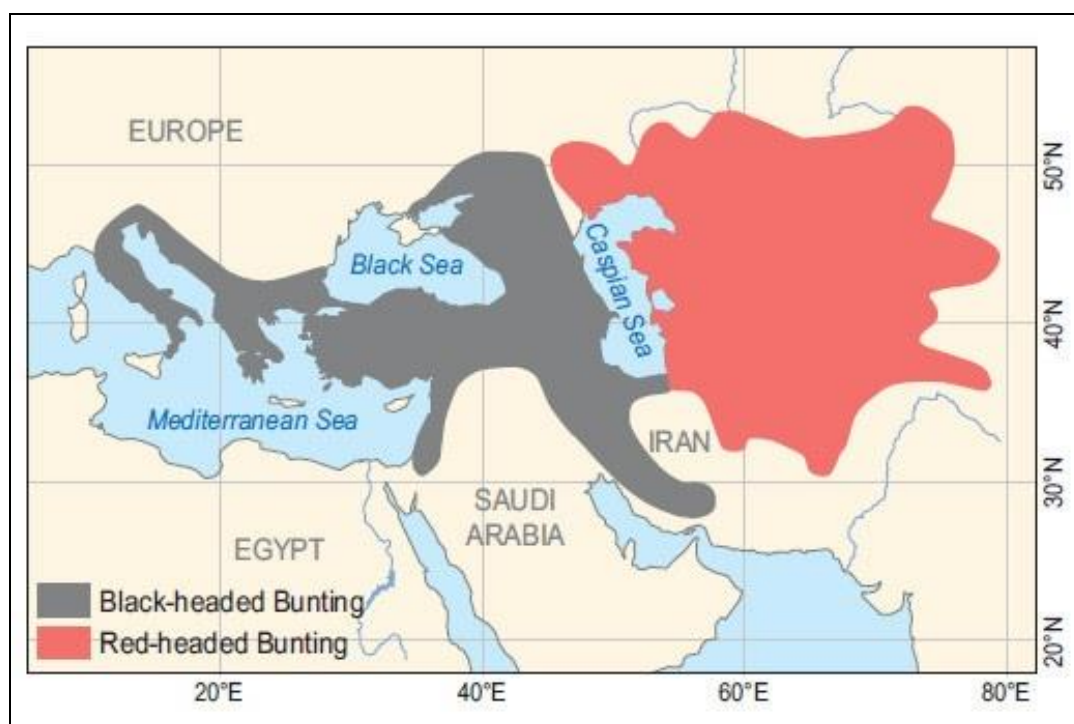
زرده‌پره سرسرخ (*E. bruniceps* Brandt, 1841) و زرده‌پره سرسیاه (*E. melanocephala* Scopli, 1769) متعلق به جنس *Emberiza* از خانواده زرده‌پره‌ها (*Emberizidae*) و راسته گنجشک‌شکلان (*Passeriformes*) هستند. خانواده زرده‌پره‌ها در مناطق جغرافیایی هولارکتیک (Holarctic)، نئوتروپیکال (Neotropical)، افروتروپیکال (Afrotropical) و اورینتال (Oriental) پراکنش دارند و اغلب زیستگاه‌های باز، نیمه‌باز و حاشیه جنگل‌ها را اشغال می‌کنند (Dickinson, 2003). این خانواده دارای ۷۶ جنس و ۳۲۶ گونه است که از این تعداد فقط ۳۵ گونه در اوراسیا مشاهده می‌شود و از این ۳۵ گونه، همگی به استثنای چهار گونه در جنس زرده‌پره (*Emberiza*) قرار می‌گیرند (Dickinson, 2003). در ایران از این جنس تاکنون ۱۷ گونه گزارش شده است (Kaboli et al., 2016). دو گونه زرده‌پره سرسیاه و زرده‌پره سرسرخ، گونه‌های نزدیک به هم هستند که در یک ناحیه تماس ثانویه (Secondary Contact Zones) در جنوب شرقی دریای خزر (تصویر ۱) طی ۷۰ سال گذشته با هم تماس پیدا کرده‌اند (Gholamhosseini et al., 2017). این برخورد منجر به بروز دورگه‌زایی و ایجاد ریخت‌های حد واسط در این منطقه شده است (Haffer, 1977; Gholamhosseini et al., 2017)؛ بر این اساس عده‌ای از پژوهشگران این دو گونه را،

شناخت ویژگی‌های فیزیکی سیگنال‌های صوتی تولیدشده توسط گونه‌های مختلف و در زمان‌های مختلف از سال، نیازمند ملاحظات خاصی در چگونگی ثبت صدا، چگونگی تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر آنها دارد (Obrist et al., 2010). به‌طور معمول همه پژوهشگران با مشکلاتی در زمان جمع‌آوری و ثبت صدای حیوانات روبه‌رو هستند؛ برای مثال صداهای زمينه محیط (اصوات سایر گونه‌ها، باد، اصوات انسانی و غیره) مشکلاتی اساسی در کیفیت اصوات ثبت‌شده و در نتیجه تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر داده‌ها به وجود می‌آورند. فعالیت‌های مربوط به بیوآکوستیک، چه در زمینه فعالیت‌های تحقیقاتی و چه عملیاتی، نیاز به تجهیزات تخصصی دارد که به‌طور معمول کمیاب و گران‌قیمت هستند (Pavan, 2008). خوشبختانه پیشرفت‌های اخیر در تجهیزات ثبت صدا و همچنین روش‌های آزمایشگاهی تجزیه و تحلیل داده‌ها تا حد زیادی این مشکلات را رفع کرده است (Hussein et

al., 2010).
 شناخت ویژگی‌های فیزیکی سیگنال‌های صوتی تولیدشده توسط گونه‌های مختلف و در زمان‌های مختلف از سال، نیازمند ملاحظات خاصی در چگونگی ثبت صدا، چگونگی تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر آنها دارد (Obrist et al., 2010). به‌طور معمول همه پژوهشگران با مشکلاتی در زمان جمع‌آوری و ثبت صدای حیوانات روبه‌رو هستند؛ برای مثال صداهای زمينه محیط (اصوات سایر گونه‌ها، باد، اصوات انسانی و غیره) مشکلاتی اساسی در کیفیت اصوات ثبت‌شده و در نتیجه تجزیه و تحلیل و همچنین تفسیر داده‌ها به وجود می‌آورند. فعالیت‌های مربوط به بیوآکوستیک، چه در زمینه فعالیت‌های تحقیقاتی و چه عملیاتی، نیاز به تجهیزات تخصصی دارد که به‌طور معمول کمیاب و گران‌قیمت هستند (Pavan, 2008). خوشبختانه پیشرفت‌های اخیر در تجهیزات ثبت صدا و همچنین روش‌های آزمایشگاهی تجزیه و تحلیل داده‌ها تا حد زیادی این مشکلات را رفع کرده است (Hussein et

دو گونه، به احتمال زیاد سیگنال‌های صوتی جنس نر در این دو گونه در دوره آوازخوانی و جلب جفت در ناحیه برخورد ثانویه تشابه بسیاری دارند (Haffer, 1977)؛ به نحوی که سبب می‌شود جنس ماده در تشخیص جفت هم‌گونه خود دچار خطا شود؛ بنابراین هدف از این مطالعه، امکان‌سنجی تفکیک ساختار سیگنال‌های صوتی این دو گونه با استفاده از تمامی سیگنال‌های صوتی ثبت شده از زمان جفت‌یابی این دو گونه، موجود در بانک صدای پرندگان، بوده است. با استفاده از این امکان‌سنجی، تأثیر آوازهای زمان جفت‌یابی بر دورگه‌زایی این دو گونه بررسی می‌شود.

صرف نظر از رنگ پر و بال متفاوت نرهاشان، یک گونه در نظر می‌گیرند (Voous, Paludan, 1940; Portenko, 1960; 1960)؛ با این وجود برخی دیگر از پژوهشگران براساس تفاوت‌های بارز ریختی بین این دو گونه، آنها را دو گونه جدا از هم معرفی کرده‌اند (Spangenberg and Sudilovskaya, 1954; Vaurie, 1956, 1959; Stresemann and Mauerberger, 1960; Paynter, 1970). به دلیل این ابهامات، رده‌بندی این دو گونه در مطالعات متعددی بررسی شده است (Paludan, 1940; Haffer, 1977; Gholamhosseini et al., 2015; Gholamhosseini et al., 2017). برخی پژوهشگران معتقدند به دلیل دورگه‌زایی بین این



شکل ۱- محدوده پراکنش زرده‌پره سرسیاه (محدوده خاکستری تیره) و زرده‌پره سرسرخ (محدوده قرمز رنگ) در اروپا و آسیا و ناحیه تماس ثانویه آنها در ایران (اصلاح شده توسط Haffer (۱۹۷۷) و Gholamhosseini و همکاران (۲۰۱۷)).

بررسی‌های بصری در اختیار کاربر قرار می‌دهد. پس از ایجاد اسپکتروگرام‌ها، با به‌کارگیری توابع «autodetect» و «manualoc»، از رکوردهای فیلترشده، داده‌های لازم جمع‌آوری شد. فرمان «autodetect» به‌طور خودکار ابتدا و انتهای صداها را در فایل‌های صوتی براساس فراوانی، مدت و ویژگی‌های دامنه فرکانس تشخیص می‌دهد. پس از بررسی اسپکتروگرام‌های خروجی، فایل‌های تصویری که با نگاه اجمالی اولیه کیفیت پایینی داشتند (برای مثال دارای صداهاى زمینه زیاد یا آوازهای ناقص) کنار گذاشته شدند؛ همچنین از تابع «speccreator» برای بررسی مجدد طبقه‌بندی‌ها و انتخاب‌ها استفاده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تصویر کردن سنجش فرکانس‌ها به کمک تابع «trackfreqs»

پیش از محاسبه ویژگی‌های مربوط به صوت، تصویری کردن (بصری کردن) برخی از سنجه‌های مهم از جمله اندازه فرکانس، سطح درستی آنالیزها را ارتقا می‌بخشد (Araya-Salas and Smith Vidaurre, 2015). به کمک تابع «trackfreqs» اسپکتروگرام‌های هر سیگنال به همراه فرکانس غالب و فرکانس بنیادی آن ایجاد شد (Araya-Salas, 2016).

آنالیز تنوع جغرافیایی با استفاده از

اندازه‌گیری‌های حاصل از «specan» و اجرای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

ویژگی‌های صوت‌ها با فرمان «specan» اندازه‌گیری شد. این تابع، ۲۲ پارامتر صوتی در همه رکوردهای مشخص شده را محاسبه می‌کند. فرمان «specan» چند

برای تجزیه و تحلیل ساختار سیگنال‌های صوتی این دو گونه از بسته warbleR در محیط R و با استفاده از کدها و توابعی از بسته‌های نرم‌افزاری SEEWAVE، TUNER و MONITOR استفاده شد. بسته warbleR محیط مناسبی را برای استفاده از توانمندی‌های محیط R به‌منظور تجزیه و تحلیل‌های پیچیده ساختار سیگنال‌های صوتی حیوانات با دسترسی آسان به منابع و داده‌های آنلاین فراهم می‌کند (Araya-Salas, 2016).

جمع‌آوری و آماده‌سازی اولیه داده‌ها

به‌منظور دستیابی به فایل‌های صداهاى ثبت شده دو گونه زرده‌پره سرسرخ و زرده‌پره سرسیاه از سایت Canto-Xeno (<https://www.xeno-canto.org>)

استفاده شد. این سایت بانکی برای ثبت صدای گونه‌های پرندگان است. مشخصات ثبت شده برای این رکوردها شامل مختصات جغرافیایی، کیفیت رکوردها، نام افراد ثبت کننده صدا و نوع سیگنال‌ها بوده است که امکان غربال‌گری فایل‌های صوتی براساس هریک از مشخصات ذکر شده را امکان‌پذیر می‌سازد. فرمت داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از تابع «mp32wav» (از توابع پکیج tuneR) از فرمت mp3 به فرمت wav تغییر داده شد؛ همچنین موقعیت جغرافیایی مکان‌های رکوردهای ثبت شده در این سایت روی نقشه با استفاده از تابع «xcmaps» مشخص شد.

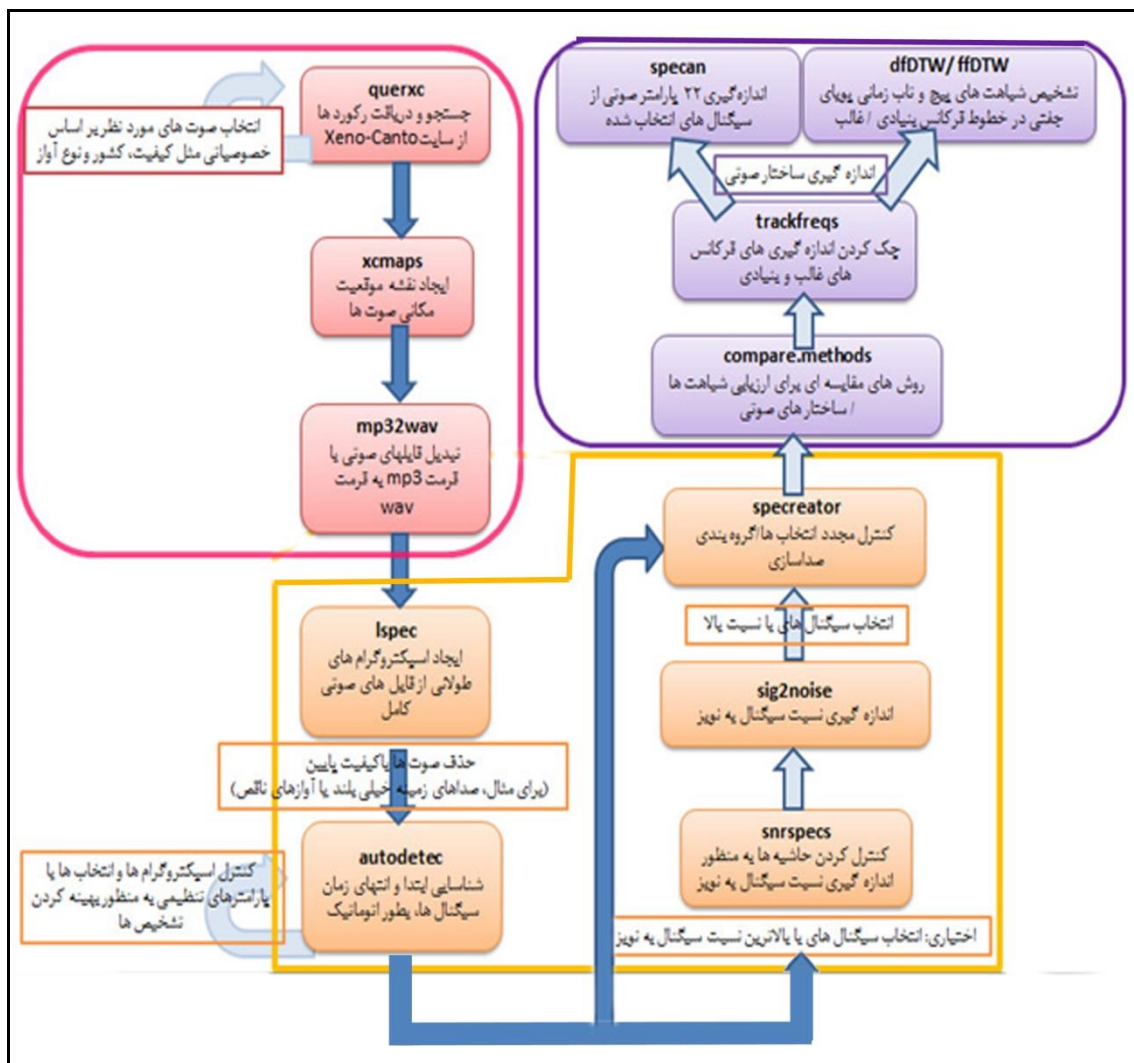
ایجاد اسپکتروگرام‌ها برای تفسیر چشمی و

طبقه‌بندی سیگنال‌ها

به کمک تابع «lspec» اسپکتروگرام‌های طولانی همه فایل‌های صوتی تولید شد. این گزینه ابزار مفیدی را برای آنالیز مجموعه‌های صوتی و فیلتر کردن با

تابع موجود در بسته *seewave* را به کار می‌گیرد؛ سپس از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis) برای بررسی اینکه آیا تنوع مشاهده شده در ساختار صوت‌ها و اندازه‌گیری شده با پارامترهای صوتی به درستی منعکس شده است یا خیر، استفاده شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای پارامترهای صوتی مدرج شده اجرا و گروه‌بندی آوازها در نمودارهای پراکندگی

(اسکتر پلات‌ها) تجزیه و تحلیل شد؛ همچنین از دو تابع «dfDTW» و «ffDTW» برای تعیین عدم شباهت‌های جفتی صوت‌ها براساس فرکانس‌های غالب و بنیادی استفاده شد. درنهایت، با استفاده از توابع «Extract PCA scores» و «Plot the 2 first PCs» اسکتر پلات دو مؤلفه نخست استخراج شد. این مراحل در تصویر ۲ خلاصه شده است.



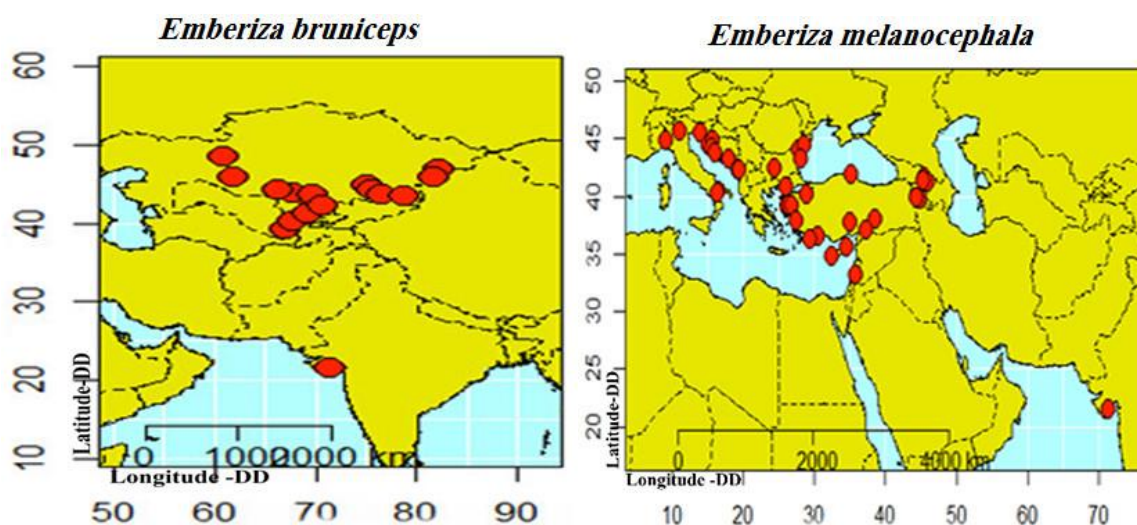
شکل ۲- فرآیند انجام تجزیه و تحلیل‌های صوت در محیط بسته *warbleR* و توابع استفاده شده در هر آنالیز. مجموعه مراحل در کادر صورتی نشان‌دهنده مراحل دریافت داده‌ها و تیمارهای اولیه، در کادر زرد نشان‌دهنده مراحل ایجاد اسپکتروگرام‌ها و ارزیابی دقت تحلیل‌ها و در کادر بنفش نمایانگر توابع استفاده شده برای ارزیابی و مقایسه ساختار صوتی است (Araya-Salas and Smith Vidaurre, 2015).

داده‌های جمع‌آوری شده

نتایج

کیفیت (A) دانلود شد. با توجه به فیلترهای استفاده‌شده در مرحله نخست، ۵۵ فایل صوتی برای زرده‌پره سرسیاه و ۳۹ فایل برای زرده‌پره سرسرخ دریافت شد. نقشه‌های پراکنش جغرافیایی مکان رکوردهای ثبت‌شده در این سایت برای دو گونه مطالعه‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

با استفاده از فرمان مربوط (querxc)، متادیتا و فایل صداهای ثبت‌شده زرده‌پره سرسرخ و زرده‌پره سرسیاه از سایت Xeno-Canto حاصل شد. با توجه به اینکه این بسته این قابلیت را دارد که فایل‌های صوتی را براساس جنس، گونه، مکان، کیفیت صدا و غیره برپایه نیاز پژوهشگر دانلود کند، در این پژوهش صداهای ثبت‌شده پرنده‌های مدنظر براساس نوع صدا (Song) و

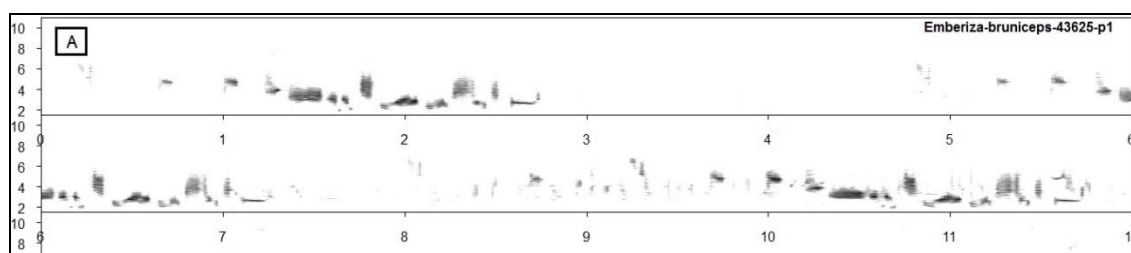


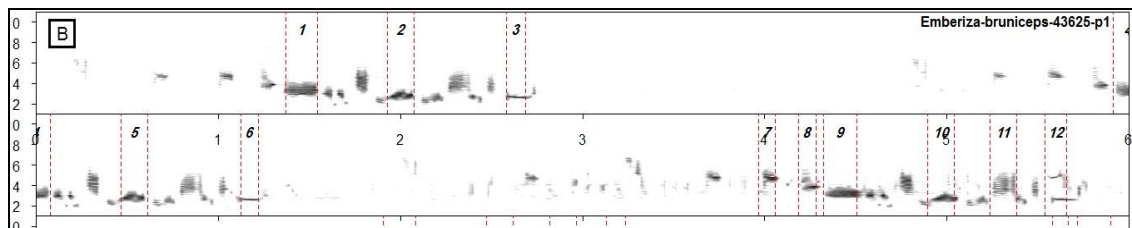
شکل ۳- پراکنش جغرافیایی مکان رکوردهای ثبت‌شده از آواز زرده‌پره سرسرخ (تصویر راست) و زرده‌پره سرسیاه (تصویر چپ) در سایت Xeno-Canto.

را نشان می‌دهد که با فرمان «autodetect» به‌طور خودکار ابتدا و انتهای آوازها براساس فراوانی، مدت و ویژگی‌های دامنه فرکانس، تشخیص داده شده است.

اسپکتروگرام‌ها و طبقه‌بندی سیگنال‌ها

شکل ۴ (A)، فایلی تصویری از اسپکتروگرام را براساس تابع «lspec» نشان می‌دهد؛ همچنین شکل ۴ (B) نمونه‌ای از فایل‌های صوتی ایجادشده از تابع قبلی



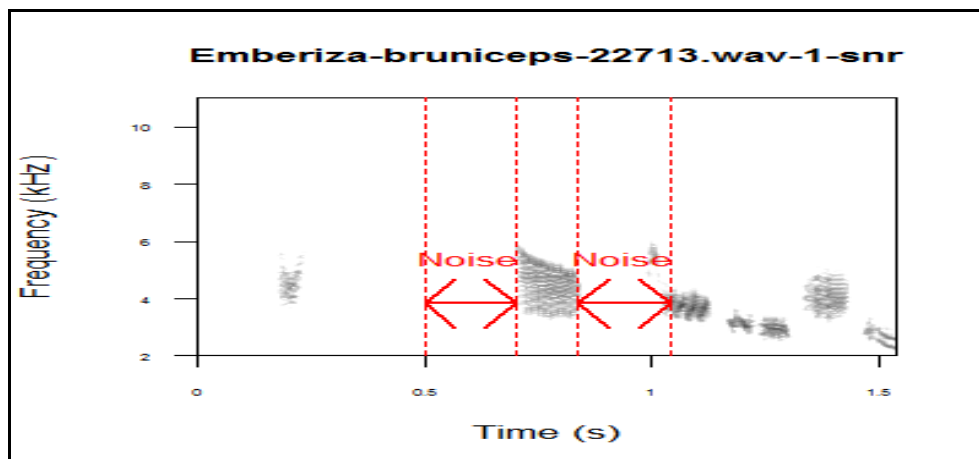


شکل ۴- (A) نمونه‌ای از فایل تصویری به دست آمده به کمک تابع «lspec» از فایل صوتی که به ردیف‌های چندگانه تقسیم شده است. (B) فایل‌های صوتی که ابتدا و انتهای صداها براساس فراوانی، مدت و ویژگی‌های دامنه فرکانس، مشخص شده است.

غربال‌گری از طریق نسبت‌های سیگنال به نویز

از آنجایی که به تعداد کمی از آوازه‌ها برای مشخص کردن ویژگی‌های هر صوت نیاز است، تعدادی از آوازه‌ها با بیشترین نسبت سیگنال به نویز (SNR) (Signal-to-Noise Ratio) به ازای هر فایل صوتی انتخاب شد. در این پژوهش، پنج عدد آواز از هر گونه

با بیشترین نسبت سیگنال به نویز انتخاب شد. تصویر ۵ نمونه‌ای از اسپکتروگرام رکوردها با بیشترین نسبت سیگنال به نویز و بیشترین کیفیت است و حاشیه مناسب برای آن تعیین شده است.



شکل ۵- نمونه‌ای از فایل تصویری برای نشان دادن نسبت سیگنال به نویز با فرمان «snrspecs».

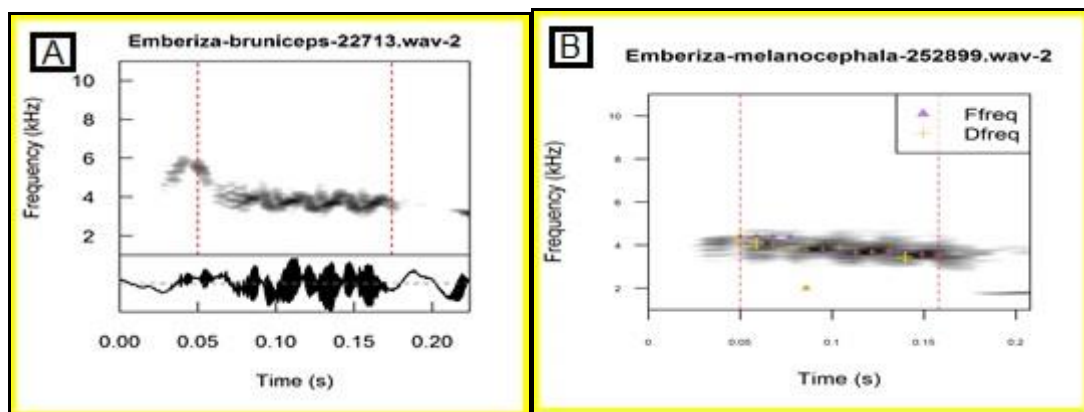
اندازه‌گیری پارامترهای صوتی

قبل از محاسبه پارامترهای مربوط به صوت، درستی برخی از سنجش‌های مهم، برای مثال اندازه‌های فرکانس، تصویرسازی می‌شود. تصویر ۶ (A) نمونه‌ای یکی از اسپکتروگرام‌ها است که فرکانس غالب (علائم مثبت زردرنگ) و فرکانس بنیادی (مثلث‌های بنفش‌رنگ) آن روی سیگنال رسم شده است. به‌طور

کلی، اندازه‌های فرکانس بنیادی به میزان سنجش‌های مربوط به فرکانس غالب مطمئن نیستند. از آنجایی که به نظر نمی‌رسد فرکانس‌های بنیادی در حد کفایت دنبال شده باشد، از بین ۲۲ پارامتر صوتی (برای مثال طول سیگنال‌ها، میانگین فرکانس‌ها، انحراف استاندارد فرکانس‌ها و غیره که لیست کامل آنها در پیوست ارائه شده است.) که در مرحله بعد اندازه‌گیری می‌شدند،

نمودارهایی برای مشاهده تغییرات سیگنال در زمان هستند و به صورت گراف پیوسته نمایش داده می‌شوند.

کنار گذاشته و اسیلوگرام‌های (Oscillogram) آنها تنها با توجه به اسپکتروگرام با فرکانس غالب رسم شد (تصویر ۶ (B)). گفتنی است که اسیلوگرام‌ها،



شکل ۶- (A) نمونه‌ای از اسپکتروگرام‌های تولیدشده از پکیج SEEWAVE در محیط R و (B) نمونه‌ای از اسپکتروگرام‌های با فرکانس غالب و فرکانس بنیادی.

درصد از واریانس تغییرات داده‌ها) در جدول ۱ ارائه شده است.

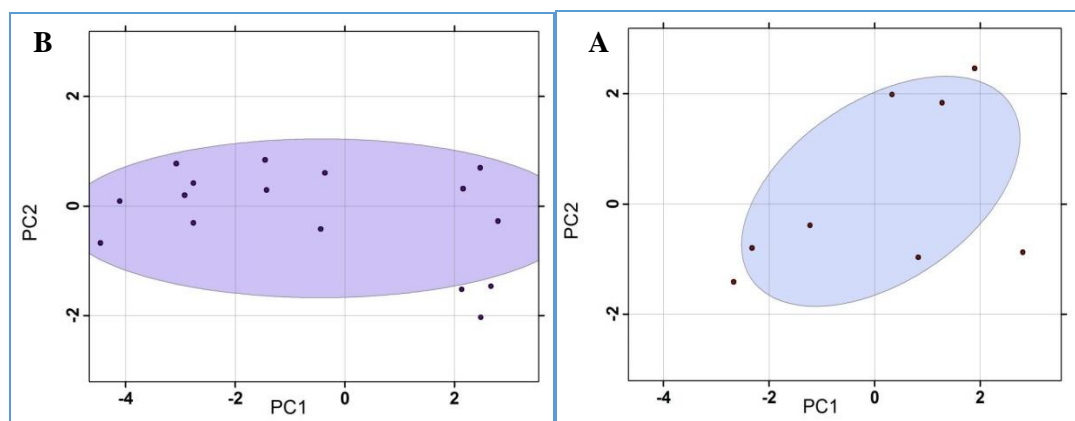
با اجرای آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای ۲۲ پارامتر صوتی (پیوست ۱)، انواع آوازها گروه‌بندی شد. به‌طور خلاصه، مقادیر پنج مؤلفه اصلی (شامل ۹۰

جدول ۱- اهمیت مؤلفه‌های اصلی برای متغیرهای صوتی زرده‌پره‌های سرسرخ و سرسیاه به تفکیک پنج مؤلفه اول (شامل حدود ۹۰ درصد از واریانس تغییرات داده‌های اولیه).

PC5	PC4	PC3	PC2	PC1	
زرده‌پره سرسرخ					
۰/۹۳۵۳۶	۱/۳۳۳۵۷	۱/۵۳۳۷	۲/۰۶۴۳	۳/۲۲۳	انحراف معیار
۰/۰۳۹۷۷	۰/۰۸۰۸۴	۰/۱۰۸۳	۰/۱۹۳۷	۰/۴۷۲	نسبت واریانس
۰/۸۹۴۶۵	۰/۸۵۴۸۸	۰/۷۷۴۰	۰/۶۶۵۷	۰/۴۷۲	نسبت تجمعی
زرده‌پره سرسیاه					
۰/۹۴۱۳	۱/۳۲۳۲	۱/۳۵۸۶	۱/۵۶۶	۳/۶۰۴	انحراف معیار
۰/۰۴۰۲	۰/۰۵۸۲	۰/۰۸۳۹	۰/۱۱۱۵	۰/۵۹۰	نسبت واریانس
۰/۸۸۴۵	۰/۸۴۴۲	۰/۷۸۶۰	۰/۷۰۲۱	۰/۵۹۰۶	نسبت تجمعی

تغییرات صوتی زرده‌پره سرسیاه را نشان می‌دهند. اسکتر پلات دو مؤلفه نخست حاصل از اجرای این آنالیز برای دو گونه زرده‌پره در شکل ۷ آورده شده است.

با توجه به جدول ۱، از ۲۲ مؤلفه اصلی حاصل از این آنالیز، دو مؤلفه اول حدود ۶۷ درصد از تغییرات صوتی زرده‌پره سرسرخ و در حدود ۷۰ درصد از



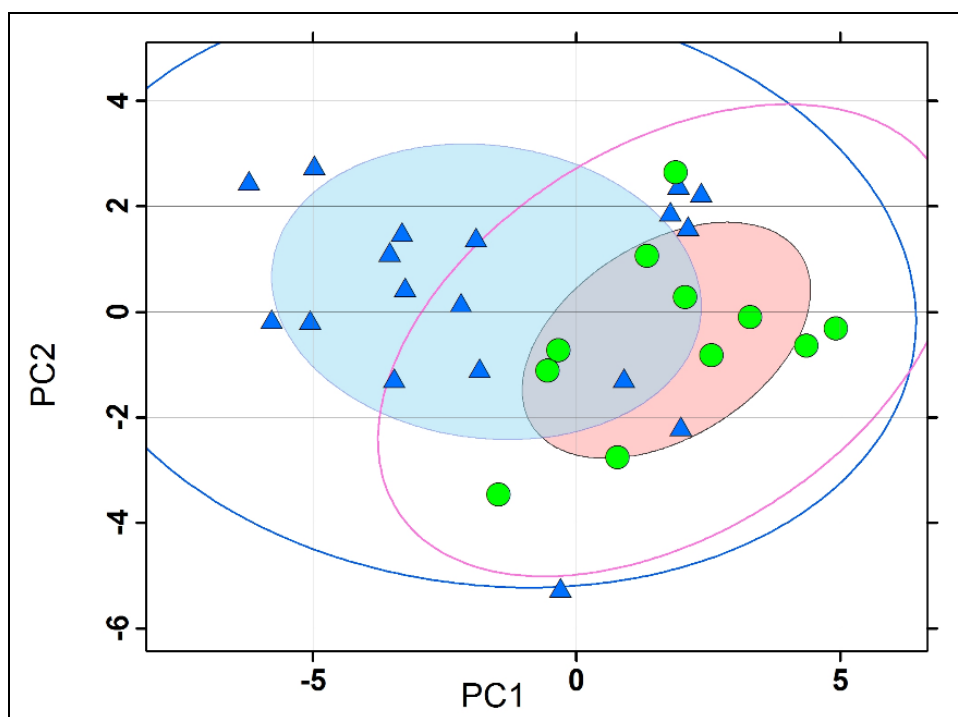
شکل ۷- اسکتر پلات دو مؤلفه نخست حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای زرده‌پره سرسیاه (A) و زرده‌پره سرسرخ (B).

اسکتر پلات مربوط نشان می‌دهد مجموع ویژگی‌های صوتی این دو گونه زرده‌پره (بیضی‌های صوتی و آبی در شکل ۱۰) نشان‌دهنده شباهت و هم‌پوشانی زیاد آوازهای آنها است.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای دسته داده ترکیب‌شده (۲۲ پارامتر صوتی برای دو گونه زرده‌پره سرسرخ و سرسیاه) در حدود ۵۷ درصد از تغییرات این ۲۲ پارامتر را در خود دارند (جدول ۲ و شکل ۸).

جدول ۲- اهمیت مؤلفه‌های اصلی برای دسته داده ترکیب‌شده از متغیرهای صوتی زرده‌پره‌های سرسرخ و سرسیاه به تفکیک پنج مؤلفه اول (شامل حدود ۹۰ درصد از واریانس تغییرات داده‌های اولیه).

PC5	PC4	PC3	PC2	PC1	
۱/۲۵۵	۱/۴۷۴۹	۱/۶۷۱۷	۲/۲۲۹	۳/۱۶۸	انحراف معیار
۰/۰۶۰۵	۰/۰۸۳۶	۰/۱۰۷۵	۰/۱۹۱	۰/۳۸۶	نسبت واریانس
۰/۸۲۸۷	۰/۷۶۱۸	۰/۶۸۴۵	۰/۵۷۷	۰/۳۸۶	نسبت تجمعی



شکل ۸- خوشه‌بندی سیگنال‌های صوتی زرده‌پره سرسرخ و زرده‌پره سرسیاه براساس مؤلفه‌های اول و دوم. دایره‌های سبزرنگ، ۱۰ فرد از زرده‌پره سرسرخ و مثلث‌های آبی‌رنگ، ۲۰ فرد از زرده‌پره سرسیاه را نشان می‌دهند. بیضی‌های صورتی و آبی نیز نشان‌دهنده گرانگه (Centroid) ۹۰ درصد (بیضی‌های صورتی و آبی‌رنگ مرکزی) و ۹۵ درصد (بیضی‌های با خط صورتی و آبی‌رنگ بزرگ) پراکنش افراد این دو گونه براساس ۲۲ پارامتر صوتی استفاده شده هستند.

بحث

ایران به علت موقعیت جغرافیایی خاص خود که محل برخورد سه ناحیه جغرافیای زیستی پالتارکتیک، اورینتال و اتیوپین است و همچنین به دلیل تنوع اقلیمی و توپوگرافی زیاد خود، در جایگاه یکی از مناطق مهم از نظر هم‌پوشانی پراکنش تعداد چشمگیری از آرایه‌های جانوری مناطق غربی و شرقی پالتارکتیک و کمربند بزرگ صحارا-سند، شناخته شده است. این هم‌پوشانی در مواقعی منجر به ایجاد نواحی دورگه‌زایی شده است (Evans, 1994; Aliabadian *et al.*, 2007). دورگه‌زایی در رده پرنندگان در نواحی تماس ثانویه، به نسبت زیاد است و در میان حدود ۱۰ تا ۱۹ درصد از پرنندگان بروز می‌کند

(Gholamhosseini *et al.*, 2017). این پدیده در

ناحیه‌ای به طول ۹۰ کیلومتر از نواحی جنوبی دریای خزر در رشته کوه البرز برای برخی گونه‌ها از راسته گنجشک‌شکلان از جمله زرده‌پره سرسرخ و زرده‌پره سرسیاه بروز کرده و باعث ایجاد تنوع ریختی متنوعی در این دو گونه شده است (Paludan, 1940; Schüz, 1959; Haffer, 1977; Gholamhosseini, *et al.*, 2015).

با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل این مطالعه، به نظر می‌رسد ویژگی‌های آوازهای این دو گونه براساس ۲۲ پارامتر صوتی استفاده شده، شباهت زیادی با هم دارند و چندان از یکدیگر جدا نشده‌اند. خوشه‌های تشکیل شده از افراد دو گونه براساس پارامترهای صوتی بررسی شده

گونه‌ای می‌شود (e.g., Pinho and Hey, 2010; Rheindt and Edwards, 2011; Abbott *et al.*, 2016; Reifová *et al.*, 2013). در واقع، جهش‌های سازشی و خنثی در طول مدت دگرجایی تسریع می‌شود؛ اما نه به اندازه‌ای که منجر به ایجاد موانع جدایی تولید مثلی پیش تخمی (Prezygotic) یا پس تخمی (Postzygotic) شود. این احتمال نیز وجود دارد که موانع تولید مثلی ایجاد شده، توسط جریان ژنی پس از تماس ثانویه خنثی شود. از آنجایی که واگرایی در سیگنال‌های صوتی، نقش کلیدی در رابطه با انزوای تولید مثلی و گونه‌زایی ایفا می‌کند (Gordinho *et al.*, 2015)، به نظر می‌رسد مکانیزم جدایی تولید مثلی (سیگنال‌های صوتی جفت‌یابی) برای این دو گونه زرده‌پره در سرزمین‌های دگرجا (آلوپاتریک) تکامل نیافته‌اند؛ به نحوی که جنس ماده این دو گونه، نر مربوط به جنس خود را در سرزمین‌های هم‌جا (Sympatry) تشخیص نمی‌دهد؛ هر چند برای مدت طولانی از هم جدا بوده‌اند؛ البته این موضوع که دو گونه ذکر شده در سرزمین‌های دگرجا چه واکنشی به آواز نر گونه دیگر نشان می‌دهند، همچنان جای سؤال دارد؛ همین‌طور بسته به نوع تعاملات بین گونه‌ای، گونه‌های هم‌جا (Co-existent) (از جمله گونه‌های نزدیک به هم که در منطقه تماس ثانویه همدیگر را ملاقات می‌کنند) می‌توانند دارای الگوهای آوازی واگرا یا همگرا شوند (Grant, 1972). مکانیزم‌هایی که منجر به همگرایی آواز در پرندگان می‌شود شامل یادگیری آواز گونه دیگر (Helb *et al.*, 1985)، سازگاری اکولوژیکی با محیط اکوستیکی محلی (Derryberry, 2009) و انتقال ژنتیکی (Wright, 1943; Slatkin, 1993; Secondi, 2011 *et al.*) است. این قبیل همگرایی‌ها با

در امتداد دو مؤلفه اول و دوم تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، هم‌پوشانی زیادی دارند؛ بر این اساس نتیجه‌گیری می‌شود که یکی از دلایل دورگه‌زایی بین این دو گونه، شباهت زیاد آوازهای آنها باشد که با وجود تفاوت ریختی و اختلاف فاحش رنگ پر و بال، این دو گونه با هم جفت‌گیری می‌کنند و این باعث ایجاد افراد دورگه بین آنها در منطقه تماس می‌شود. به نظر می‌رسد واگرایی اندک در این صفت (آوازخوانی) بین تبارهای جغرافیایی یا زیرگونه‌های برخی گونه‌ها سبب ناتوانی تشخیص آواز افراد از دودمان‌ها یا زیرگونه‌های مختلف از یکدیگر شده است. محتمل‌ترین دلیل ارائه شده تا به امروز آن است که این تبارها یا زیرگونه‌ها به تازگی از یکدیگر جدا شده‌اند و زمان برای تکامل مکانیزم‌های رفتاری جداکننده تولید مثلی پیش تخمی (آواز) آنها کافی نبوده است (Dai, *et al.*, 2017).

هافر نیز اعلام کرد با وجود تنوع جغرافیایی در آوازهای زرده‌پره سرسرخ و زرده‌پره سرسیاه، آوازهای آنها در منطقه برخورد ثانویه از یکدیگر تشخیص‌پذیر نیستند؛ اما جریان ژن بین این دو گونه، برای اینکه گونه‌ای واحد در نظر گرفته شوند کافی نیست (Haffer, 1977)؛ همچنین Alström و همکاران (۲۰۰۸) واگرایی ژنتیکی به نسبت زیادی را با مقایسه دو ژن *cyt b* (Cytochrome b) و ODC (Ornithine decarboxylase) در این دو تاکسون خواهری (Sister taxa) نشان دادند.

وقتی گونه‌های نزدیک به هم، که در مناطق دگرجا (Allopatry) واگرا شده‌اند، دوباره در مناطق تماس ثانویه با هم ملاقات کنند، اغلب انزوای تولید مثلی ناقصی از خود نشان می‌دهند که منجر به جریان ژن بین

Haavie *et al.*, 2004; Halfwerk *et al.*, 2016;)
(Hamao, *et al.*, 2016

از آنجایی که در این مطالعه هیچ آوازی از این دو گونه از منطقه تماس ثانویه در دسترس نبوده است، تعیین میزان شدت دوره‌های، چگونگی واگرایی آوازه‌ها و پاسخ به تفاوت‌های آوازه‌ها نیازمند نمونه‌برداری تکمیلی از آوازه‌های این دو گونه و مقایسه ساختار ژنتیکی جمعیت‌های آنها در درون و بیرون از منطقه تماس است.

در ایران پژوهش‌های بسیار اندکی در زمینه تجزیه و تحلیل صدای پرندگان انجام شده است و آنچه بیش از همه در این گونه مطالعات خودنمایی می‌کند، فقدان اطلاعات کافی به دلیل وجود نداشتن تجهیزات باکیفیت جمع‌آوری صدا و به تبع آن نبود بانک ثبت صدای انواع گونه‌های پرنده است. از آنجایی که تجزیه و تحلیل صدا کمک شایانی به مطالعات رشته تنوع زیستی می‌کند، این مطالعه راهنمایی به منظور استفاده از بسته warbler برای پژوهشگران علاقه‌مند در آینده است.

جفت‌گیری بین گونه‌ای ادامه می‌یابد و این نیز به نوبه خود منجر به افزایش دوره‌های بین گونه‌ای و اختلاط ذخیره ژنی گونه‌ها می‌شود (Secondi, *et al.*, 2003). پدیده همگرایی در مناطق هم‌جا به احتمال زیاد مزایای سازشی دارد؛ برای مثال همگرایی آواز برای نرهای دفاع‌کننده از قلمرو خود در مقابل نرهای گونه‌های دیگر مفید است؛ زیرا هزینه رقابت بین گونه‌ای را کاهش می‌دهد (Cody, 1969)؛ همچنین شباهت آوازه‌ها ممکن است ارتباطات بین گونه‌ای را تسهیل کند که به دنبال آن رقابت بین گونه‌ای بر سر غذا کاهش می‌یابد (Orr, 1945)؛ همچنین همگرایی آواز گونه‌های مختلف هم‌جا ممکن است ناشی از تقلید کردن آواز گونه‌های هم‌جا باشد (Sorjonen, 1986; Vokurková, 2013). اگر تعداد افراد ماده یک گونه نسبت به تعداد نرها کم باشد، ممکن است نرها پارامترهای صوتی خود را برای جذب جفت گونه دیگر به پارامترهای صوتی پرنده نر غیر هم‌گونه نزدیک کنند

منابع

- Abbott, R., Albach, D., Ansell, S., Arntzen, J. W., Baird, S. J., & Bierne, N. (2013). Hybridization and speciation. *J. Evolutionary Biology*, 26, 229-246.
- Aliabadian, M., & Nijman, V. (2007). Avian hybrids: incidence and geographic distribution of hybridization in birds. *Contributions to Zoology*, 76(1), 59-61.
- Aliabadian, M., Kaboli, M., Kiabi, B., & Nijman, V. (2007). Contact and hybrid zone hotspots and evolution of birds in the Middle East. *Progress in Natural Science*, 17(3), 103-107.
- Alström, P., Olsson, U., Lei, F., Wang, H. T., Gao, W., & Sundberg, P. (2008). Phylogeny and classification of the Old World Emberizini (Aves, Passeriformes). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 47(3), 960-973.
- Araya-Salas, M., & Smith-Vidaurre, G. (2016). warbler: An R package to streamline analysis of animal acoustic signals. *Methods in Ecology and Evolution* 8(2), 184-191.
- Araya-Salas, M., & Smith-Vidaurre, G. (2015). Streamlining acoustic analysis. 25th International Bioacoustics Conference Murnau, Bavaria-Germany.
- Bradbury, J., & Vehrencamp, S. (2011). *Principles of Animal Communication*. Sinauer Associates Inc, Sunderland, MA.

- Catchpole, C. K., & Slater, P. J. B. (1995). *Bird Song, Biological Themes and Variation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cody, M. L. (1969). Convergent Characteristics in Sympatric Species: A Possible Relation to Interspecific Competition and Aggression. *Condor Journal*, 71, 222-239.
- Dai, C., Hao, Y., He, Y., & Lei, F. (2017). The absence of reproductive isolation between non-sister and deeply diverged mitochondrial lineages of the black-throated tit (*Aegithalos concinnus*) revealed by a multilocus genetic analysis in a contact zone. *BMC evolutionary biology*, 17(1), 1-12.
- Derryberry, E. P. (2009). Ecology shapes birdsong evolution: variation in morphology and habitat explains variation in white-crowned sparrow song, *The American Naturalist Journal*, 174, 24-33.
- Dickinson, C. E. (Ed.) (2003). *The Howard and Moore Complete Checklist of the Birds of the World*. London: Christopher Helm.
- Evans, M.I. (Ed.) (1994). *Important Bird Areas in the Middle East*. Cambridge, UK: Birdlife International.
- Grant, P. R. (1972). Convergent and divergent character displacement. *Biological Journal of the Linnean Society*, 4(1), 39-68.
- Garstang, M. (2004). Long-distance, Low-frequency Elephant Communication. *Journal of Comparative Physiology*, 190, 791-805.
- Gholamhosseini, A., Aliabadian, M., & Darvish, J. (2015). A Study of Sexual Dimorphism and Morphological Variation of Red-Headed Bunting (*Emberiza Bruniceps*) within its Hybrid Zone with Black-headed bunting (*Emberiza melanocephala*) in the Iranian Plateau. *Journal of Animal Researches (Iranian Journal of Biology)*, 1, 72-84 (in Persian)
- Gholamhosseini, A., Aliabadian, M., Darvish, J., Töpfer, T., & Sætre, G. (2017). An Expanding Hybrid Zone between Black-Headed and Red-Headed Buntings in Northern Iran. *Ardea Journal*, 105(1), 27-36.
- Gordinho, L. d. O., Matheu, E., Hasselquist, D., & Neto, J. M. (2015). Song divergence between subspecies of reed bunting is more pronounced in singing styles under sexual selection. *Animal Behavior Journal*, 107, 221-231
- Haavie, J., Borge, T., Bures, S., Garamszegi, L. Z., Lampe, H. M., Moreno, J., Qvarnstrom, A., Torok, J., & Satre, G. P. (2004). Flycatcher song in allopatry and sympatry– convergence, divergence, and reinforcement. *Journal of Evolutionary Biology*, 17, 227-237.
- Haffer, J. (1977). *Secondary Contact Zones of Birds in Northern Iran*. Bonner Zoologische Monographien 10, Bonn.
- Halfwerk, W., Dingle, C., Brinkhuizen, D. M., Poelstra, J. W., Komdeur, J., & Slabbekoorn, H. (2016). Sharp acoustic boundaries across an altitudinal avian hybrid zone despite asymmetric introgression. *Journal of Evolutionary Biology*, 29, 1356-1367.
- Hamao, S., Sugita, N., & Nishiumi, I. (2016). Geographic variation in bird songs: examination of the effects of sympatric related species on the acoustic structure of songs. *Acta Ethologica Journal*, 19, 81-90.
- Hansen, B. T., & Slagsvold, T. (2003). Rival imprinting: interspecifically cross-fostered tits defend their territories against heterospecific intruders. *Animal Behavior Journal*, 65, 1117-1123.
- Helb, H. W., DowsetteLemaire, F., Bergmann, H. H., & Conrads, K. (1985). Mixed singing in European songbirds - a review. *Journal of Comparative Ethology*, 69, 27-41.
- Hussein, W. B., Hussein, M. A., & Becker, T. (2012). Spectrogram enhancement by edge detection approach applied to bioacoustics calls classification. *Signal & Image Processing: An International Journal (SIPIJ)*, 3(2), 1-20.
- Marler, P., & Slabbekoorn, H. (2004). *Nature's music, The science of birdsong*. San Diego, CA: Elsevier. pp. 132-177.

- Martin, P. R., & Martin, T. E. (2001). Behavioral Interactions Between Coexisting Species: Song Playback Experiments with Wood Warblers. *Ecology Journal*, 82, 207-218.
- Mundinger, P. C. (1982). Microgeographic and Macrogeographic variation in the acquired vocalization of birds. In: *Acoustic Communication in Birds* (Ed. by D. E. Kroodsma & E. H. Miller), pp. 147-208. New York: Academic Press.
- Obrist, M. K., Pavan, G., Sueur, J., Riede, K., Llusia, D., & Marquez, R. (2010). Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. In J. Eymann, J. Degreef, C. Häuser, J. C. Monje, Y. Samyn, & D. VandenSpiegel (Eds.), *ABC Taxa. Manual on Field Recording Techniques and Protocols for All Taxa Biodiversity Inventories* pp. 68-99.
- Paludan, K. (1940). Contributions to the ornithology of Iran. In: *Danish Scientific Investigations in Iran, part II* (eds. K. Jessen & R. Spärck), pp. 11-54.
- Pavan, G. (2008). Short field course on bioacoustics. Italia: Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali Università di Pavia.
- Paynter, R. A. Jr. (1970). *Emberizinae*. In: *Peters, Check-list of Birds of the World. vol. XIII*. Cambridge, Massachusetts.
- Portenko, L. A. (1960). *Pticy SSSR*. Moscow and Leningrad (Akad. Nauk.), 4, 416.
- Price, T. (2008). *Speciation in birds*. Greenwood Village, CO: Roberts and Company Publishers.
- Pinho, C., & Hey, J. (2010). Divergence with gene flow: models and data. *Annual Review Ecology Evolution and Systematics*, 41, 215-230.
- Reifová, R., Majerová, V., Reif, J., Ahola, M., Lindholm, A., & Procházka, P. (2016). Patterns of gene flow and selection across multiple species of *Acrocephalus* warblers: footprints of parallel selection on the Z chromosome. *BMC Evolution Biology*, 16, 130.
- Rheindt, F. E., & Edwards, S. V. (2011). Genetic introgression: an integral but neglected component of speciation in birds. *Auk Journal*, 128, 620-632.
- Schüz, E. (1959). *Die Vogelwelt des Südkaspischen Tieflandes*. E. Schweizerbart's che Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. pp. 199. [In German: The avifauna of the South Caspian lowlands].
- Searcy, W. A., & Yasukawa, K. (1996). Song and female choice. In D. E. Kroodsma, & E. H. Miller (Eds.), *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds* (pp. 454-473). Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Secondi, J., Bretagnolle, V., Compagnon, C., & Faivre, B. (2003). Species-specific song convergence in a moving hybrid zone between two passerines. *Biological Journal of the Linnean Society*, 80, 507-517
- Secondi, J., Bordas, P., Hipsley, C. A., & Bensch, S. (2011). Bilateral song convergence in a passerine hybrid zone: genetics contribute in one species only. *Evolution Biology Journal*, 38, 441-452.
- Slagsvold, T., Hansen, B. T., Johannessen, L. E., & Lifjeld, J. T. (2002). Mate choice and imprinting in birds studied by cross-fostering in the wild. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 269, 1449-1455.
- Sorjonen, J. (1986). Mixed singing and interspecific territoriality - consequences of secondary contact of two ecologically and morphologically similar nightingale species in Europe. *Ornis Scandinavica Journal*, 17, 53-67.
- Spangenberg, E. P., & Sudilovskaya, A. M. (1954). Gattung *Emberiza* L., Bunting. In: G. P. Dementiev and N. A. Gladkov (eds.). *Birds of the Soviet Union*, 5, 449-595.
- Stresemann, E., & Mauersberger, G. (1960). *Emberiza melanocephala* Scopoli, *E. icterica* Eversmann. In: Stresemann, E. und L. A. Portenko (eds.) *Atlas der Verbreitung palaearktischer Vögel*, Lief. 1. Akademie Verlag, Berlin.

- Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. PLoS ONE, 3(12), e4065.
- Vaurie, C. (1956). Systematic notes on Palearctic birds. No. 23. Fringillidae: the genera Emberiza, Calcarius, and Plectrophenax. Ibid. no. 1805, 27 pp.
- Vaurie, C. (1959). The Birds of the Palearctic Fauna. London: Passeriformes. Witherby Ltd.
- Voous, K. H. (1960). Atlas of European Birds. Nelson, Edinburgh. 284 p. (German translation, 1962).
- Vokurková, J., Petrusková, T., Reifová, R., Kozman, A., Mořkovský, L., Kipper, S., Weiss, M., Reif, J., Dolata, P. T., & Petrušek, A. (2013). The causes and evolutionary consequences of mixed singing in two hybridizing songbird species (*Luscinia* spp.). PLoS ONE, 8(4), e60172
- Wright S. (1943). Isolation by distance. Genetics Journal, 28, 114-138.

پیوست

جدول ۱- پارامترهای صوتی اندازه گیری شده توسط تابع specan و استفاده شده برای مقایسه سیگنال‌ها

توصیف	تابع
طول سیگنال	duration
میانگین فرکانس (کیلوهرتز)	meanfreq
انحراف استاندارد از فرکانس	sd
فرکانس متوسط	median
اولین چندک فرکانس	Q25
دومین چندک فرکانس	Q75
دامنه بین چندکی فرکانس	IQR
چولگی	skew
درجهٔ اوج در یک نمودار آماری	kurt
آنتروپی طیفی	sp.ent
مسطح بودن طیفی	sfm
حالت فرکانس (کیلوهرتز)	mode
مرکزیت فرکانس	centroid
فرکانس اوج (فرکانسی با بیشترین انرژی)	peakf
متوسط فرکانس اساسی	meanfun
حداقل فرکانس اساسی	minfun
حداکثر فرکانس اساسی	maxfun
متوسط فرکانس غالب	meandom
حداقل فرکانس غالب	mindom
حداکثر فرکانس غالب	maxdom
دامنه فرکانس غالب	dfrange
شاخص تعدیل	modindx