تعامل انسان و اطلاعات، جلد پنجم، شماره دوم (تابستان 1397): 46-72
http://hii.khu.ac.ir
مقاله اصیل پژوهشی

شناسایی و دسته‌بندی خودکار دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی سنتی ایرانی: بررسی تحلیلی و تطبیقیِ پژوهش‌های انجام شده

***امیر وفائیان:** دانشجوی دکتری علم اطلاعات و دانش‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) amirvafa@gmail.com
کیوان بُرنا: عضو هیأت علمی، گروه علوم کامپیوتر، دانشکده علوم ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
حامد ساجدی: عضو هیأت علمی، گروه برق و الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
داریوش علیمحمدی: عضو هیأت علمی، گروه علم اطلاعات و دانش‌شناسی، دانشکده روانشناسی و علوم تربیتی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
پویا سرایی: عضو هیأت علمی، گروه موسیقی، دانشکده هنر، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: شناسایی و دسته‌بندی خودکار دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی سنتی ایرانی که بیش از یک دهه توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است، یکی از شاخه‌های حوزه بازیابی اطلاعات موسیقی محسوب می‌شود. گفتارِ حاضر با هدف مرور پژوهش‌های پیشین در این حوزه و نیز تحلیلِ مسائل، رویکردها و موانعِ پیش رو انجام شده است.

روش پژوهش: این پژوهش از نوع مروری و شیوه گردآوری داده‌ها، بر اساس مطالعه اسنادی - کتابخانه‌ای بوده است.

یافته‌ها: اصلی‌ترین محدودیت‌ها و دلایل ناکارآمدی پژوهش‌های این حوزه را می‌توان ناشی از انجام پژوهش‌ها به‌صورت موازی و مجزّا، نبودِ پایگاه داده منسجم برای موسیقی ایرانی و نداشتنِ دانش کافی پژوهشگران از مبانی نظری موسیقی سنتی ایرانی دانست.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، دو رویکردِ ماکرو و میکرو را می‌توان برای پژوهش‌های مرتبط با شناسایی خودکار موسیقی ایرانی متصور شد. عمده پژوهش‌هایی که تاکنون منتشر شده‌اند با رویکردِ ماکرو بوده و در آن صرفاً بر اساس اِشِل صوتیِ پنج دستگاهِ اصلی، سعی در تفکیک و شناسایی خودکارِ این دستگاه‌ها از یکدیگر داشته‌اند. ازآنجاکه تقسیم‌بندیِ دستگاه‌ها از اصالت لازم برخوردار نبوده و در این خصوص بینِ نظریه‌پردازان و موسیقی‌دان‌ها، از نظر تعداد دستگاه و مرزِ بین آن‌ها اتفاق‌نظر وجود ندارد، انجامِ پژوهش‌هایی با رویکردِ میکرو که در آن تأکید بر شناسایی خودکارِ گوشه‌ها بر اساسِ بررسی سیرِ ملودیِ جمله‌های مُعرّف هر گوشه است، پیشنهاد شده است.

کلیدواژه‌ها: موسیقی سنتی ایرانی، ردیفِ دستگاهی موسیقی ایرانی، گوشه، بازیابی اطلاعات موسیقایی، شناسایی خودکار موسیقی، استخراج ویژگی‌های صوتی، دسته‌بند

دریافت: 1397/4/5
پذیرش: 1397/7/10

تعارض منافع: گزارش نشده است.
منبع حمایت کننده: این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول است.

شیوه استناد به این مقاله

APA: Vafaeian, A., Borna, K., Sajedi, H., Alimohammadi, D., Sarai, P. (2018). Automatic Identification and Classification of the Iranian Traditional Music Scales (Dastgāh) and Melody Models (Gusheh): Analytical and Comparative Review on Conducted Researches. *Human Information Interaction*. 5(2): 46-72. (Persian)

Vancouver: Vafaeian A, Borna K, Sajedi H, Alimohammadi D, Sarai P (2018). Automatic Identification and Classification of the Iranian Traditional Music Scales (Dastgāh) and Melody Models (Gusheh): Analytical and Comparative Review on Conducted Researches. *Human Information Interaction*. 2018, 5(2): 46-72. (Persian)

انتشار مجله تعامل انسان و اطلاعات با حمایت مالی دانشگاه خوارزمی انجام می‌شود.
انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC-SA 3.0 صورت گرفته است.

Human Information Interaction. Vol. 5, No. 2 (Summer 2018):46-72.
http://hii.khu.ac.ir
Original Article

Automatic identification and classification of the Iranian traditional music scales (dastgāh) and melody models (gusheh): analytical and comparative review on conducted research

***Amir Vafaeian:** PhD Student of Knowledge and Information Studies, Kharazmi University, Tehran, Iran (Corresponding Author) amirvafa@gmail.com
Keyvan Borna: Faculty Member of Computer Sciences, Faculty of Mathematical Sciences and Computer, Kharazmi University, Tehran, Iran
Hamed Sajedi: Faculty Member of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran
Dariush Alimohammadi: Faculty Member of Knowledge and Information Studies, Kharazmi University, Tehran, Iran
Pouya Sarai: Faculty Member of Music Department, Faculty of Art, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran

Received: 06/26/2018 Accepted: 10/02/2018

Abstract

Background and Aim: Automatic identification and classification of the Iranian traditional music scales (*Dastgāh*) and melody models (*Gusheh*) has attracted the attention of the researchers for more than a decade. The current research aims to review conducted researches on this area and consider its different approached and obstacles.

Method: The research approach is content analysis and data collection method is based on the documentary-library study.

Results: Findings indicated that the main obstacles and reasons for the inefficiency of this area researches are due to performing the researches in parallel and individually, lack of a coherent dataset for Iranian traditional music and also, lack of researcher's knowledge of the theoretical foundations of Iranian traditional music.

Conclusion: It could be considered two main approaches for researches in automatic identification of the Iranian traditional music. The major researches has been published until now, is conducted based on *Macro* approach, which merely considers the scales of five *Dastgāhs* in distinguishing them from each other. Since *Dastgāhs* division does not have enough authenticity and there is no consensus on the number of *Dastgāhs* and their boundaries among the Iranian music theorists, *Micro* approach has been suggested for future researches, which tries to identify short melody models (*Gushehs*) based of melody sequences of representative phrase of the *Gusheh*.

Keywords: Iranian Traditional Music, Iranian Music Repertoire, Melody Model (Gusheh), Music Information Retrieval, Automatic Identification of Music, Music Feature Extraction, Classifier

Conflicts of Interest: None
Funding: This article has been extracted from thr first author's PhD thesis.

How to cite this article

APA: Vafaeian, A., Borna, K., Sajedi, H., Alimohammadi, D., Sarai, P. (2018). Automatic Identification and Classification of the Iranian Traditional Music Scales (Dastgāh) and Melody Models (Gusheh): Analytical and Comparative Review on Conducted Researches. *Human Information Interaction*. 5(2): 46-72. (Persian)

Vancouver: Vafaeian A, Borna K, Sajedi H, Alimohammadi D, Sarai P (2018). Automatic Identification and Classification of the Iranian Traditional Music Scales (Dastgāh) and Melody Models (Gusheh): Analytical and Comparative Review on Conducted Researches. *Human Information Interaction*. 2018, 5(2): 46-72. (Persian)

The journal of *Human Information Interaction* is supported by Kharazmi University, Tehran, Iran.
This work is published under CC BY-NC-SA 3.0 licence.

مقدمه

تحلیل و پردازش خودکارِ موسیقی، حدود نیم‌قرن است که توجه پژوهشگرانِ حوزه بازیابی اطلاعات موسیقی را به خود جلب کرده است. اصطلاح «بازیابی اطلاعات موسیقی»[1] در مقاله‌ای که توسط مایکل کَسلِر[2] در مجله قدیمیِ «چشم‌اندازهای موسیقی نو[3]» منتشر شد، برای اولین بار در سال 1966 استفاده شد. (کَسلِر[4]، 1966، ص 59). با وجود آنکه در دهه 1970 مباحثی در خصوص توسعه الگوریتم‌های تشخیص نغمه[5] مطرح شد، بااین‌حال تثبیت و شکل‌گیری حوزه بازیابی اطلاعات موسیقی، به‌عنوان یک رشته مجزا، بعد از سال 2000 و در نتیجه پیشرفت‌های چشمگیر در رشته‌های مهندسی الکترونیک و کامپیوتر و همچنین، افزایش سرعت پردازنده‌های کامپیوتری، اتفاق افتاد. «انجمن بین‌المللی بازیابی اطلاعات موسیقی[6]» از سال 1999 تاکنون به‌طور سالانه نشست‌ها و کنفرانس‌هایی را در خصوص داده‌های مرتبط با موسیقی برگزار می‌کند که جزو مهم‌ترین رُخدادهای این حوزه به شمار می‌رود (حیدریان[7]، 2016، ص 34 و 35).

بازیابی اطلاعات موسیقی، ماهیتی میان‌رشته‌ای داشته و جامعه‌ای متشکل از پژوهشگرانِ حوزه‌های گوناگون در سطح بین‌المللی، در حال توسعه آن هستند (وفائیان، 1396، ص 31). این حوزه بر پایه علومی همچون موسیقی‌شناسی، ریاضیات و آمار، مهندسی صدا، علوم کامپیوتر، علوم اطلاعات و کتابداری، روانشناسیِ شناختی، زبان‌شناسی، تعامل انسان و اطلاعات، حقوق و بازرگانی (دونی[8]، 2003، ص 296) بنا شده است و هر یک از زاویه‌ای خاص، حوزه بازیابی اطلاعات موسیقی را مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهند. ازاین‌رو، این حوزه، با هم‌افزایی و به‌کارگیری زوایایِ مختلف دانش موضوعی، از جمله مبانی موسیقی، ریاضیات، پردازش سیگنال‌های صوتی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تشخیص آماری الگو و انواع یادگیری در شبکه‌های عصبی، سعی در حل مسائل و رفع نیازهای اطلاعاتی علاقه‌مندان و کاربران از اقشار و انواع مختلف موسیقی دارد.

برخی فعالیت‌ها و پژوهش‌هایی که امروزه در حوزه بازیابی اطلاعات موسیقی در حال انجام است، عبارت‌اند از: دسته‌بندی، خوشه‌بندی و مُدل‌سازی؛ استخراج ویژگی‌های موسیقایی تک‌صدایی و چندصدایی؛ تطبیق الگو و شناسایی شباهت و جداسازی (گواهیان جهرمی، 1389، ص 30). انواع دسته‌بندی‌ها در این حوزه نیز خود شامل موضوعاتِ گسترده‌ای است؛ مانند شناسایی هنرمند (اعم از نوازنده یا خواننده)، تشخیص خاستگاه موسیقی یا حال و هوایی که موسیقی ایجاد می‌کند، تفکیک و تشخیص خودکارِ سازهای استفاده شده در اجراهای چندنفره[9] و گروهی، بازشناسی نغمه‌های بکار رفته و شناسایی خودکار گام و مُد[10] (مقام، راگ یا دستگاه)[11] در یک اثر موسیقایی (وفائیان، 1396، ص 31). بر این اساس، رده‌بندی، دسته‌بندی و شناسایی خودکار موسیقی سنتی ایرانی نیز تلاش می‌کند تا ازیک‌طرف با تجزیه‌وتحلیل مبانی نظری این نوع موسیقی و از طرف دیگر، به‌کارگیری فنون یادگیری ماشینی[12] (مانند ماشین‌های برداری پشتیبان[13])، به کمک این حوزه بشتابند.

در این پژوهش با مرورِ آثار و نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناسایی خودکار دستگاه در موسیقی سنتی ایرانی، به ترسیمِ وضعیتِ کنونی و نیز مسائل، رویکردها و چالش‌های پیش رویِ آن می‌پردازد. ازاین‌رو، سعی شده تا منابع منتشرشده این حوزه از جوانب مختلف، مانند چارچوب و محدوده پژوهش‌ها، نوع پایگاه داده، ویژگی‌های صوتی و طبقه‌بندها، منابع اصلیِ بخش مبانی موسیقی، پیشنهادهای ارائه شده و نیز برخی نقاط مثبت و کاستی‌ها مورد بررسی قرار گیرند. حلقه مفقوده این است که چرا با وجود انجامِ پژوهش‌های قابل توجه در این حوزه، نتایجِ آن‌ها از کارآمدیِ لازم برخوردار نبوده است. در ادامه، پس از طرح مفاهیم و تعاریفِ موسیقی و نیز مبانی بُنیادینِ موسیقی سنتی ایرانی، روش انجام پژوهش و بررسی منابع و متون از زوایای مختلف، سعی شده تا بدین پرسش پاسخ داده شود.

مبانی نظری موسیقی سنتی ایرانی (مفاهیم و تعاریف)

عناوین فرعی این بخش، به ترتیب عبارتند از: موسیقی ردیف دستگاهیِ ایران، اَرکان موسیقی، کارکرد درجات در موسیقی غربی و ایرانی، انواع گام، فواصل موسیقایی و آناتومی گوشه که در ادامه، این مفاهیم توضیح داده شده است:

- موسیقی ردیف دستگاهیِ ایران

هنرهای زیبا، نمایانگر احساسات و روحیات هر قومی است و درنتیجه، موسیقی اقوام و کشورهای مختلف نیز که تحت تأثیر

---

1. MIR: Music Information Retrieval
2. Michael Kassler
3. Perspectives of New Music (Journal Coverage: 1962-until now)
4. Kassler, M. (1966)
5. Pitch trackers
6. International Society for Music Information Retrieval
7. Heydarian, Peyman (2016)
8. Downie
9. Ensemble
10. Automatic Key/Mode Recognition
11. به بخش انواع گام مراجعه شود.
12. machine learning techniques
13. Support vector machine (SVM)

احساسات و نحوه زندگی مردم است، تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند (خالقی، 1384). از گذشته‌های دور، موسیقیِ ایرانی، با سابقه هزاران ساله‌اش، فراز و نشیب‌های فراوانی داشته است؛ اما از دوره قاجار، به اهتمام خاندان فراهانی، موسیقی ایرانی وارد دسته‌بندی، تنظیم و تدوین تازه‌ای، با هفت دستگاه[1] (به نام‌های شور، سه‌گاه، چهارگاه، ماهور، همایون، نوا و راست‌پنج‌گاه) و پنج آواز می‌شود (کیانی، 1393، ص 5)، به‌طوری‌که این تقسیم‌بندی امروزه نیز رواج دارد[2]. در متون مختلف موسیقی از آوازها، با عنوان ملحقات یا متعلقات نیز یاد شده است. از دستگاه شور، چهار شعبه یا آواز به نام‌های ابوعطا، افشاری، بیات‌ترک و دشتی منشعب می‌شود که به «متعلقات شور» موسوم‌اند. از دستگاه همایون هم آواز بیات‌اصفهان منشعب می‌شود (فخرالدینی، 1392، ص 99). هر یک از این دوازده دستگاه و آواز موسیقی ایرانی، دارای گوشه‌های متعددی است. مثلاً برخی از گوشه‌های مهم آواز دشتی عبارت‌اند از: چوپانی، دشتستانی، گیلکی، غم‌انگیز، دیلمان، اوج دشتی (بوسَلیک)، سَمَلی و بیات‌کُرد.

ازاین‌رو، هفت دستگاهِ موسیقی ایرانی، اساس و پایه موسیقی در ایران بوده و می‌توان آن را موسیقی رسمی کشور دانست. هر یک از این هفت دستگاه، حال و هوا و البته طرفداران خاص خود را دارد. از طرف دیگر، همان‌طور که زبان فارسی در کنار زبان‌ها و گویش‌های محلی، زبان رسمی مردم ایران است و تقریباً همه اقوام، علاوه بر گویش محلی خود، به این زبان رسمی نیز صحبت می‌کنند و آن را می‌فهمند، موسیقی دستگاهی و سازهای آن نیز در تمام شهرهای کشور به‌عنوان موسیقی رسمی و ملی ایران شناخته می‌شود (رضاخواه، 1389، ص 17). آنچه امروز به‌عنوان موسیقی کلاسیک یا رسمی ایران شناخته می‌شود، با اینکه تأثیراتی از موسیقی نواحی و گویش‌های مختلف ایران (مانند لر، فارس، بلوچ، کرد و آذری) گرفته است، اما این تأثیرات همه در قالب لهجه فارسی تغییر یافته و یا تعدیل شده است (توکلی، 1386، ص 47). امروزه، چکیده و برآیند فرهنگی این نوع موسیقی، در قالب ردیفِ موسیقی دستگاهی (به معنای رِپُرتوار[3] مجموعه) تجلّی یافته است[4] است[4] (بهنام‌نیا، 1389، ص 5).

- اَرکان موسیقی

تفکیک مرز بین موسیقی سنتی ایرانی با دیگر انواع موسیقی (بخصوص موسیقی کلاسیک غربی که بیشتر پژوهش‌ها در این حوزه انجام شده)، ضروری به نظر می‌رسد. بااین‌وجود، به‌طور کامل و قطعی نمی‌توان مبانی نظری موسیقی شرقی (و از جمله موسیقی سنتی ایرانی) را از مبانی نظری موسیقی غربی تفکیک نمود و برخی مباحث و اَرکان، در هر دو نوع موسیقی، مشترک است.

اصواتِ موسیقی، به‌واسطه چهار رُکن اصلی و بنیادی[5] از دیگر صداها متمایز می‌شوند: نواک[6]، کِشش (ارزش زمانی نغمه، دیرند، فاصله زمانی، مدت تداوم صوت، ریتم یا وزن)[7]، دینامیک (شدتِ صوت یا دامنه)[8] و طَنین (رَنگ صوتی یا شیوش)[9] (کِیمی بِن، 1380، ص 37). ازآنجاکه در تفکیک و تمیز دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی از یکدیگر، ویژگی نواک از اهمیت بیشتری برخوردار است، در ادامه بدان می‌پردازیم:

نواک که در متون مختلف، با عناوین دیگری چون زیروبمی، پیچ فرکانسی، ارتفاع صوت یا نام نغمه نیز بکار رفته است، صفتی است ادراکی از صدا که از طریق تنظیم فرکانس (بسامد) یک موج سینوسی، با دامنه دلخواه برای انطباق با صدای مورد نظر به دست می‌آید. ازاین‌رو، نواک هر نغمه را می‌توان در سه مفهومِ بسامد، نام نغمه و طولِ موج نیز توصیف کرد. بسامد، تعداد نوسان در مدت

---

[1]. در کتاب‌های قدیم موسیقی، از قرن نهم هجری به بعد، به جای واژه‌های «مقام»، «پرده» و «شَدّه»، از واژه «دستگاه» استفاده شده است (فخرالدینی، 1392، ص 46). از مشهورترین مقام‌ها، می‌توان به دوازده مقام صفی‌الدین اُرمَوی (613-693 هـ. ق) اشاره کرد که پایه موسیقیِ شرق، بر تعدیلی است که وی از گام موسیقی ایرانی از پرده‌بندیِ ساز تَنبورِ خراسان وارد نموده است (بَرکِشلی، 1340، ص 177). نظریه وی درباره فواصل موسیقی، قابل‌قبول‌ترین نظریه برای شناخت مُد و مقام در سراسر خاورمیانه اسلامی به‌شمار می‌رود. در حال حاضر، تنها شش مقام از این دوازده مقام حفظ شده است و فواصل آن در موسیقی دستگاهی ایران موجود است (کیانی، 1393، صص 26 و 28).

[2]. افرادی چون روح‌الله خالقی و مرتضی حنانه (حنانه، 1367، ص 12 و 43) با این منطق که ارتباط بین دستگاه شور و متعلقاتش، واضح‌تر و قوی‌تر از آن است که بتوان هر یک از مقام‌های چهارگانه را دستگاهی مستقل و جداگانه به حساب آورد، قائل به دسته‌بندی فوق از دستگاه‌ها و آوازهای موسیقی سنتی ایرانی هستند و این دیدگاه امروزه نیز متداول و رایج شده و در ردیف اساتیدی چون حسینقلی، میرزاعبدالله و درویش‌خان نیز بکار رفته است. با این حال، اساتیدی نیز به غیر از دسته‌بندی فوق قائل هستند. مثلاً علی‌نقی وزیری، موسیقی سنتی ایرانی را در پنج دستگاه خلاصه می‌کند. یا عده‌ای دیگر (از جمله دکتر هرمز فرهت)، قائل به آواز و شعبه‌های فرعی دستگاه‌ها نبوده و هر یک از مقام‌های ابوعطا، بیات‌ترک، افشاری، دشتی و بیات‌اصفهان را دستگاهی مستقل به‌شمار می‌آوردند؛ از این رو، تعداد دستگاه‌ها را دوازده ذکر کرده است.

[3]. Repertoire

[4]. در نحوه تنظیم و توالی گوشه‌های ردیف و همچنین سبک و سیاق نوازندگی آنها که توسط چند استاد مسلّم چند نسل گذشته روایت شده و به نسل حاضر رسیده است، اختلافاتی وجود دارد که باعث شده برای هر دستگاه/آواز، چندین ردیف وجود داشته باشد. از این رو، روایت هر استاد را به نام همان استاد می‌نامند (صفوت و کارُن، 1391، ص 142). همچنین، ردیف‌های موسیقی ایرانی را می‌توان به دو دسته سازی و آوازی تقسیم کرد که ردیفِ سازی گسترده‌تر از ردیف آوازی است. از معروف‌ترین ردیف‌های سازی، میرزاعبدالله، میرزاحسینقلی، ابوالحسن صبا و موسی معروفی (1356) و نیز از ردیف‌های آوازی، عبدالله دوامی و محمود کریمی را می‌توان نام برد (فخرالدینی، 1392، ص 30؛ مبانی نظری موسیقی ایرانی، 1388، ص 41). در این میان، ردیف میرزاعبدالله (1222-1297 ش.) که نزدیک به 250 گوشه دارد، رایج‌ترین ردیفِ آموزشی برای سازها است.

[5]. Four main tone attributes

[6]. Pitch

[7]. Duration (Note Value/Time Interval)

[8]. Dynamics (Loudness, Intensity)

[9]. Timbre (Tone color)

جدول 1- دو نظام نام‌گذاری جهانی برای هفت نغمه موسیقی (از چپ به راست)

از بم به زیر	1	2	3	4	5	6	7	8
نامگذاری هِجایی	***Do***	Re	Mi	Fa	Sol	***La***	Si	Do
	دو	ر	می	فا	سُل	**لا**	سی	دو
نامگذاری الفبایی	***C***	D	E	F	G	***A***	B	C

زمان معین (معمولاً یک ثانیه) است که واحد آن هِرتز است. طولِ موج، تجسم دیگری از بسامد است و واحد اندازه‌گیری آن سانتی‌متر (یا متر) است. هر چه طول موج کوتاه‌تر باشد، صدای حاصل زیرتر خواهد بود و برعکس.

الفبای موسیقی، نغمه (نُت)[1] نام دارد. برای همه صداهای موسیقایی، از بَم‌ترین تا زیرترین آن‌ها، فقط هفت نام وجود دارد که حداکثر نُه بار تکرار می‌شوند[2]. نام‌گذاری این هفت نغمه به دو شکل هِجایی یا الفبایی رایج است (جدول 1). نام‌گذاری نغمه‌ها در برخی کشورها (ازجمله فرانسه، ایتالیا و ایران) از نظام هجایی و در کشورهای انگلیسی زبان (انگلستان و امریکا) و آلمانی زبان (اتریش و آلمان)، از نظام الفبایی تبعیت می‌کنند (منصوری، 1390، صص 33-31).

- کارکرد درجات در موسیقی غربی و ایرانی

گام دیاتونیک و همین‌طور گام‌های هفت دستگاه موسیقی سنتی ایرانی، متشکل از هشت نغمه پیاپی است که هر نغمه را درجه آن می‌نامند. درجه یکم را پایه یا تونیک[3]، درجه دوم را روپایه[4]، درجه سوم را میانی[5]، درجه چهارم را زیرنمایان[6]، درجه پنجم را نَمایان[7]، نَمایان[7]، درجه ششم را رونمایان[8]، درجه هفتم را محسوس (حساس)[9] و بالاخره درجه هشتم را هِنگام (اُکتاو)[10] نامند. هر درجه درجه نام خاص، نقش و کارکرد ویژه‌ای در یک گام را بر عهده دارد؛ به‌عنوان مثال، درجه پنجم هر گام (نمایان) پس از پایه، مهم‌ترین نغمه گام است. همچنین، نغمه هفتم گام (محسوس)، واجد چنان حساسیتی است که موجب حرکت آن به‌طرف نغمه هِنگام (یا پایه) می‌شود.

به اعتقاد حنانه (1367، ص 38) نقشی که نغمه «شاهد» در موسیقی ایرانی به‌عهده دارد، منطبق با همان نقشی است که «تونیک» (درجه یکم) در موسیقی غربی دارد. یا نغمه «ایست» را می‌توان منطبق بر نغمه «نمایان» (درجه پنجم) و همچنین «متغیر» را منطبق بر نغمه محسوس (درجه هفتم) دانست. بااین‌وجود، نباید تصور کرد که چنین انطباقی به معنای کارکرد یکسان و برابرِ درجات در این دو نوع موسیقی است؛ چرا که اساساً در مبانی موسیقی ایرانی و غربی و به تبعیت از آن در کارکرد درجات آن‌ها، تفاوت‌هایی وجود دارد. به‌عنوان مثال، درجه پنجم یا نمایان، پایه و اساس موسیقی کلاسیک غربی است. با اینکه این نغمه در موسیقی ایرانی هم نقشی را عهده‌دار است، ولی در اساس و سازندگی و گسترش گوشه‌ها و دستگاه‌ها، دارای اعتبار نیست. در عوض، فاصله چهارم که در پوست و رگ هر شنونده ایرانی و شرقی ریشه دوانده است، دارای چنین اعتبار و کیفیتی در موسیقی سنتیِ ایرانی است (حنانه، 1367، ص 74). ازاین‌رو، در تبیین نقشِ نغمات، نغمه شاهد مهم‌ترین نقش را در تعیین هویت مُدال برعهده دارد، چرا که اگر شاهد را تغییر دهیم، مَقام و مُد نیز تغییر خواهد کرد. عناصری که به کمک آن‌ها، یک نغمه از یک اِشل صوتی می‌تواند نقش و کارکردِ نغمه شاهد را پیدا کند، عبارت‌اند از: طَنین صدا و غنای هارمونیکی، تکرار و فراوانی بیشتر یک نغمه، مقدار کشش نغمه و جهش از نغمه دیگر[11]. پس از نغمه شاهد، به ترتیب انواع مختلف ایست و به‌ویژه نغمه خاتمه، نغمه‌های متغیرِ کارکردی[12] و در نهایت نغمه آغاز دارای اهمیت ویژه هستند (اسعدی، 1382، 51).

- انواع گام: گام بالقوه و بالفعل

یکی از ارکان تشخیص دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی ایرانی، مبحث گام و تشخیصِ «فواصل بینِ نغمه‌ها» در این دستگاه‌ها

---

[1]. در این مقاله، بجای واژه «نُت» از «نغمه» استفاده شده است.

[2]. وسعت اصواتی که در موسیقی بکار گرفته می‌شوند، حدود نُه اُکتاو است. بدین معنا که دامنه صوتی برای اجرای کلیه قطعات موسیقی، در هر سَبک و با هر سازی، بین بم‌ترین نغمه، یعنی C0 (نغمه دو در اُکتاو صفر) با فرکانسِ 16/351 هِرتز (در کوکِ دیاپازون) و زیرترین نغمه، یعنی B8 (نغمه سی در اُکتاو هشتم) با فرکانس 7902/13 قرار دارد.

[3]. Tonic
[4]. Supertonic
[5]. Mediant
[6]. Subdominant
[7]. Dominant
[8]. Sub-mediant
[9]. Leading-note/sensible
[10]. Octave

[11]. ارجاع به نغمه شاهد، یکی از بارزترین ویژگی‌های موسیقی ایرانی است. بیشتر مواقع به نظر می‌رسد از سوی نغمه دیگر به نغمه شاهد حمله می‌شود. این جهش معمولاً از نغمه همسایه‌ی بم‌تر انجام می‌شود. در این حالت، نغمه اول، بسیار سریع و تند اجرا می‌شود. برای آشنایی بیشتر، مراجعه شود به طلایی (1394، ص 22 و 23).

[12]. Functional

است که در متون مختلف از آن با عنوانِ «الگو»، «شابلون» و «اِشِل صوتی[1]» نیز یاد شده است. هرگاه یک الگوی موسیقایی در فاصله یک اُکتاو نوشته و استفاده شود، یک گام موسیقایی[2] تشکیل تشکیل می‌شود (لوی[3]، 2006، ص 16). به‌عبارت‌دیگر، گام از اصوات معین و پی‌درپی تشکیل شده که با فاصله‌های معین و حساب شده به دنبال هم قرار می‌گیرند و آخرین نغمه آن، اُکتاوِ بالایی است[4]. آنچه در هر گام اهمیت دارد، تعداد اصوات پیاپی و نیز فاصله میان آن‌ها است که این عوامل، نوع گام را تعیین می‌کند. امروزه در موسیقی غربی، گام‌ها از هر نغمه که آغاز شوند، به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند: 1. گام‌های بالقوه (کروماتیک[5]) 2. گام‌های بالفعل (دیاتونیک[6]).

گام بالقوه یا کروماتیک، پایه و اساس تشکیل گام بالفعل (دیاتونیک) است. وقتی تمام نغمه‌های مورد استفاده در یک موسیقی (مثلاً موسیقی ایرانی، هندی یا اروپایی) را به ترتیب از بَم به زیر، در فاصله یک اُکتاو می‌نویسیم، به گام بالقوه آن موسیقی دست پیدا می‌کنیم. به‌عبارت‌دیگر، این گام با آغاز از هر نغمه‌ای، به فاصله‌های نیم‌پرده‌ای (در موسیقی غربی) یا رُبع پرده‌ای (در موسیقی ایرانی) درجه‌ها را طی کرده، به‌تدریج بالا می‌رود تا در نغمه سیزدهم (در موسیقی کلاسیک غربی) و در نغمه هفدهم یا بیست و چهارم[7] (در موسیقی ایرانی) به اُکتاو همان نغمه آغاز برسد برسد (منصوری، 1376، ص 99 و مبانی نظری موسیقی ایرانی، 1388، 26).

فاصله بین درجه‌ها در گام بالفعل یا دیاتونیک (برخلاف گام کروماتیک) یکدست و برابر نیست و الگوی قرار گرفتن این فاصله‌ها در هر گونه با گونه دیگر متفاوت است. امروزه در موسیقی کلاسیک غربی، رایج‌ترین انواع گام دیاتونیک (که به آن گام طبیعی نیز می‌گویند)، ماژور (بزرگ) و مینور (بزرگ) نام دارند که هر دو گام، شامل هشت نغمه (با احتساب نغمه اُکتاو آخر) بوده (منصوری، 1376، ص 102) و مجموع فاصله‌های میان نغمه‌ها (درجه‌های متوالی)، متشکل از پنج پرده و دو نیم‌پرده است. گامِ بالفعل در موسیقی سنتی ایرانی به دستگاه تعبیر شده است[8].

گامِ بالفعل، اساساً از ترکیبِ دو دانگ و یک فاصله طنینی (دوم بزرگ) تشکیل شده است. یکی از تفاوت‌های عمده گام بالفعل در موسیقی کلاسیک غربی و موسیقی ایرانی، نحوه قرار گرفتن دو دانگ است، به‌طوری‌که در موسیقی کلاسیک غربی، فاصله طنینی بینِ دو دانگ قرار می‌گیرد، درحالی‌که دستگاه‌ها و مُدهای اصلی در موسیقی ایرانی، بر اساس ترکیب دو دانگِ پشت سرهم و پیوسته که در انتهای این دو دانگ، یک فاصله طنینی قرار می‌گیرد ساخته شده‌اند[9].

- فواصل موسیقایی

مفهوم فواصل در موسیقی ایرانی و اثرات آن بر ساختار و طبقه‌بندی ردیف موسیقی ایرانی، یکی از مهم‌ترین مسائلی است که مورد توجه موسیقی‌دان‌ها بوده است. اختلافِ در نواک دو نغمه، فاصله موسیقایی را ایجاد می‌کند (گواهیان جهرمی، 1389، ص 7 و 8). انواع فواصل موسیقایی عبارت‌اند از: فواصل دوم (نغمات هم‌جوار)، فاصله سوم (فاصله شخصیت بخش)، فواصل دُرُست (شامل فاصله هشتم یا اُکتاو، فاصله پنجم یا پنتاکورد و فاصله چهارم یا دانگ) و نیز فاصله ششم و هفتم. در ادامه، فاصله دوم و چهارم (دانگ) به دلیل اهمیت بیشتر توضیح داده شده‌اند (طلایی، 1394، صص 21-13):

نیم‌پرده در موسیقی غربی، کوچک‌ترین فاصله میان دو نغمه پیاپی است. این فاصله در موسیقی ایرانی رُبع‌پرده است؛ با این تفاوت که این فاصله در موسیقی غربی تعدیل شده است ولی این امر در موسیقی ایرانی (و به‌طور گسترده‌تر در موسیقی مشرق زمین) به

---

[1]. به باور طلایی (1394، ص 13) واژه فرانسوی اِشِل «échelle» در موسیقی اصطلاحی است که از مفهوم نردبان و یا پلکان وام گرفته شده است. یک اِشل موسیقی به وسیله فواصل متصلی که آن را تشکیل می‌دهد - یعنی فواصل بین درجات همسایه - فارغ از هر ایده مایه (تونالیته)، تونیک و غیره شناخته می‌شود. واژه «اِشل» (که مفهوم پلکانِ درجات موسیقی را در ذهن تداعی می‌کند) در موسیقی‌های مُدال، همچون موسیقی ایرانی، مفهوم صحیح‌تری از واژه «گام» است که مفهوم کارکرد درجات (فونکسیون) و محدوده اکتاو را نیز به ذهن متبادر می‌سازد.

[2]. Musical Gamut

[3]. Loy, Gareth (2006)

[4]. نسبتِ بسامدِ (فرکانس) صدای بالاییِ هِنگام، یا همان فاصله اُکتاو (interval of octave)، دو برابرِ صدای پایینی است (کمال‌پورتراب، 1393، ص 13).

[5]. Chromatic Scale

[6]. Diatonic Scale

[7]. بر اساس نظریه وزیری، کلیه ملودی‌ها، گوشه‌ها و قطعات ساخته شده در موسیقی سنتی ایرانی را می‌توان در یکی از گام‌های پنجگانه طبقه‌بندی کرد (حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری، 2012، ص 157). بر این اساس، چنانچه فواصل مشخص هر یک از این پنج دستگاه را با هر یک از درجات 24 تایی گام بالقوه آغاز کنیم، در مجموع و به طور بالقوه می‌توان 120 دستگاه در موسیقی سنتی ایرانی را تعریف کرد. البته چنین تصوری بیشتر جنبه نظری داشته و در عمل تعداد دستگاه‌هایی که تشکیل و نواخته می‌شوند، بسیار کمتر از این عدد است. برای مثال، از بین 24 درجه گامی که برای دستگاه شور می‌توان تشکیل داد در عمل اولاً بیشتر از 17 نغمه در هیچ گام بالقوه‌ای استفاده نمی‌شود و دوماً از این 17 درجه نیز، حداکثر پنج تُنالیته گام شور، یعنی شورِ دو، ر، می، سُل و لا اجرا و نواخته می‌شوند.

[8]. اصطلاح «دستگاه» در موسیقی ایرانی را می‌توان با واژه «گام» (Diatonic Scale) در موسیقی غربی، «راگا یا راگ» (Raga/Raag) در موسیقی هندی و نیز واژه مَقام (موقام) (Mugam) در موسیقی ترکی و مَکام (Maqam) در موسیقی عربی مترادف دانست. در تعریف موسیقی غربی، توالی هشت نُت پیاپی که دارای نسبت فواصل معینی از یکدیگر هستند را گام می‌گویند. همین تعریف را می‌توان برای هفت دستگاه اصلی موسیقی ایرانی (ماهور، شور، سه‌گاه، چهارگاه، همایون، نوا و راست‌پنجگاه) بکار بُرد، با این تفاوت که در موسیقی سنتی ایرانی، در اغلب گوشه‌های ردیف (ملودی‌های کوتاه)، بجای هشت نغمه، توالی 4 یا 5 نغمه در نظر گرفته می‌شود.

[9]. به بخش فواصل موسیقایی مراجعه شود.

جدول 2- چهار دانگ بنیادین و فواصل بین آنها از نغمهٔ سل تا نغمهٔ دو (از راست به چپ)

نام دانگ بنیادین	درجه اول	درجه دوم	درجه سوم	درجه چهارم
شور (S)	G	A♭	Bb	C
چهارگاه (C)	G	A♭	B	C
ماهور (M)	G	A	B	C
نوا (N)	G	A	Bb	C

جدول 3- فواصل چهار دانگ بنیادین در موسیقی سنتی ایرانی (از چپ به راست)

نام دانگ بنیادین	فاصله اول	فاصله دوم	فاصله سوم
شور (S)	3/4	3/4	1
چهارگاه (C)	3/4	5/4	1/2
ماهور (M)	1	1	1/2
نوا (N)	1	1/2	1

دلیل ماهیت این نوع موسیقی و ترجیح اساتید اهل فن انجام نگرفته است تا از این طریق، دست نوازنده را در اعمال سلایق خود در کوک فواصل رُبع پرده و بداهه‌نوازی باز بگذارد.

در موسیقی ایرانی، به این دلیل که نغمات در اکثر موارد به‌صورت پیوسته و پلکانی حرکت می‌کنند، فاصله‌ی دوم رایج‌ترین فاصله‌ای است که در این موسیقی از آن استفاده می‌شود. با وجود دامنه وسیعی از انعطاف‌ها و کم‌وزیاد شدن‌های دو نغمه همسایه، از لحاظ نظری تمام گونه‌های فاصله دوم در موسیقی سنتی ایرانی، به یکی از انواع زیر تعلق دارند:

1. دومِ کوچک (ب: بقیه[1]): 1/2 پرده
2. دومِ خنثی (جـ: مجنب): 3/4 پرده
3. دومِ بزرگ (ط: طنینی): 1 پرده
4. دومِ بیش بزرگ (هـ: بیش‌طنینی: بقیه+مجنب): 5/4 پرده

در موسیقی ایرانی فاصله چهارم که به آن دانگ گفته می‌شود، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. این فاصله ازآنجاکه فاصله‌ای «درست» است، به‌مثابه چارچوب عمل می‌کند و بین سه فاصله «درست» مهم (یعنی فواصل اُکتاو، پنجم و چهارم که هر سه فاصله از قدیم در ایران مرسوم بوده است[2]) کوچک‌ترین فاصله است.

گردش نغمات در موسیقی سنتی ایرانی عموماً در محدوده یک دانگ صورت می‌گیرند (مبانی نظری موسیقی ایرانی، 1388، ص 23). طلایی (1394)، بر اساس تجربه و تحلیل‌هایی که طی سالیان متمادی از رپرتوار موسیقی ایرانی انجام داده، به این نتیجه رسیده است که حتی پیچیده‌ترین ساختارهای مُدال در ردیف موسیقی ایرانی، بر اساس چهار دانگ بنیادین بنا شده‌اند[3] (جدول 2).

در جدول 3، این دانگ‌ها، بر اساس فواصل بینِ درجه‌ها نشان داده شده‌اند. همان‌طور که گفته شد، گامِ بالفعل، اساساً از ترکیبِ دو دانگ و یک فاصله طنینی (دوم بزرگ) تشکیل شده است. بر این مبنا و نیز بر اساس تجربه و دانش نگارنده، دیدگاهِ پنج مُدِ اصلی و الگوی دستگاهی در موسیقی ایرانی را می‌توان به‌صورت جدول 4 نشان داد.

در روایات قدیمی ردیف، آمیختگی بیشتری بین دستگاه‌های شور و سه‌گاه وجود داشت و تعدادی از گوشه‌های شور در دستگاه سه‌گاه نیز نواخته می‌شد (طلایی، 1394، ص 15). ازاین‌رو، مقایسه نسبت فواصل و اِشِل صوتی دو دستگاه سه‌گاه با شور دوم در جدول 4 نیز بیانگر این است که تفاوت آن‌ها تنها در رعایت ترتیب این فواصل بوده و تعیین کننده نوع دستگاه و معیار متمایزکننده آن‌ها از یکدیگر، نه فواصل گام، بلکه همانند دیگر متعلقات شور، نقش درجات (نغمه‌های شاهد و ایست) است. بر این اساس، اِشِل صوتی چهار دستگاه اصلی، بر اساس دودانگی‌های پیوسته (طلایی، 1394، ص 16) را می‌توان به صورت جدول 5 ارائه کرد.

[1]. واژگان داخل پرانتز، در رسالات قدیمی موسیقی ایرانی بکار رفته است. البته امروزه، برخی از اساتید نیز از این واژگان استفاده می‌کنند.

[2]. مبانی نظری موسیقی ایرانی، 1388، ص 12

[3]. در موسیقی غربی، هر گام بالفعل، به دو دانگ بعلاوه یک فاصله دوم بزرگ (بین این دو دانگ) قابل تقسیم است. در این نوع موسیقی، برخلاف موسیقی ایرانی، گام از اصالت بیشتری نسبت به دانگ برخوردار بوده و مفهوم دانگ بیشتر ارزش نظری داشته و از اهمیت چندانی برخوردار نیست (مبانی نظری موسیقی ایرانی، 1388، ص 23).

جدول 4- اِشِل صوتی و فواصل نغمه‌ها در پنج دستگاه اصلی (گام بالفعل) موسیقی سنتی ایرانی (از چپ به راست)

ردیف	دو دانگ اصلی	دانگ اول			دانگ دوم			فاصله طنینی در انتهای دو دانگ
	نام دستگاه	فاصله اول	فاصله دوم	فاصله سوم	فاصله چهارم	فاصله پنجم	فاصله ششم	فاصله هفتم
1-1	شور اول (نوا و متعلقات شور)	3/4	3/4	1	1	1/2	1	1
1-2	شور دوم	3/4	3/4	1	3/4	3/4	1	1
2	سه‌گاه	3/4	1	3/4	3/4	1	1	3/4
3	دستگاه همایون (و آواز اصفهان)	3/4	5/4	1/2	1	1/2	1	1
4	چهارگاه	3/4	5/4	1/2	1	3/4	3/4	1/2
5	ماهور (و راست‌پنجگاه)	1	1	1/2	1	1	1	1/2

جدول 5- اِشِل صوتی در چهار دستگاه اصلی (گام بالفعل) موسیقی سنتی ایرانی بر اساس دودانگی‌ها (از چپ به راست)

ردیف	دو دانگ اصلی	دانگ اول			دانگ دوم		
	نام دستگاه	فاصله اول	فاصله دوم	فاصله سوم	فاصله چهارم	فاصله پنجم	فاصله ششم
1-1	شور اول (نوا و متعلقات شور)	S			N		
1-2	شور دوم	S			S		
2	دستگاه همایون (و آواز اصفهان)	C			N		
3	چهارگاه	C			1	3/4	3/4
4	ماهور (و راست‌پنجگاه)	M			1	1	1

همان‌طور که مشاهده می‌شود، گامِ بالفعلِ بیشترِ دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی، در یکی از دانگ‌های اول یا دوم با یکدیگر اشتراک دارند.

- آناتومی گوشه

هر گوشه شخصیت مستقل دارد. مدت زمان اجرای گوشه‌ها به‌ندرت از پنج دقیقه تجاوز می‌کند و بیشتر آن‌ها نسبتاً کوتاه هستند. مثلاً برخی گوشه‌های کوتاه نیز بین 10 تا 12 ثانیه اجرا می‌شوند. در تمام ردیف‌های موجود، برخی گوشه‌های دستگاه شور، مانند رضوی، شهناز و سلمک بلند و برخی دیگر، مانند زیرکش سلمک و گلریز کوتاه هستند (نِتِل، 1393، ص 60). تبیین فرم واحد برای همه گوشه‌ها کار ساده‌ای نیست، ولی همان‌طور که می‌توان راجع به «نَحو» در متن ادبی و یا درباره قالب شعری، مانند غزل صحبت کرد، می‌توان راجع به آناتومی گوشه هم صحبت کرد و اجزاء و کارکرد قسمت‌های مختلف آن را مشخص کرد.

بر اساس تحلیلِ طلایی (1394، صص 41-36) از ردیف موسیقی سنتی ایرانی، یک گوشه کامل را می‌توان به ترتیب به جمله‌ها[1] و بخش‌های: آغازین، مُعرّف، گسترشی، تکمیلی، پایانی و ختم تجزیه و تفکیک کرد. در این تبیین از آناتومی گوشه، جمله مُعرّف مهم‌ترین بخش گوشه بوده و شامل ملودی خاص و یا دیگر ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که مختص همان گوشه است و به همین جهت، گوشه با آن شناسایی می‌شود. این ویژگی انحصاری می‌تواند الگویی ریتمیک باشد، مثل کرشمه؛ یا ملودی‌های خاصی باشد، مثل لیلی و مجنون یا غم‌انگیز و یا می‌تواند تحریر خاصی باشد، مثل جوادخانی و یا پاساژ، مانند مُحیّر.

روش‌شناسی

این پژوهش از نوع مروریِ نظام‌مند[2] بوده و با استفاده از شیوه مطالعه اسنادی- کتابخانه‌ای انجام شده است؛ به‌نحوی‌که تمامیِ پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناسایی خودکار موسیقی سنتی ایرانی، از ابتدا تاکنون (1379 تا 1397 شمسی)، جزو جامعه پژوهش بوده است و از جنبه‌های مختلفی چون چارچوب و محدوده پژوهش‌ها، نوع پایگاه داده، ویژگی‌های صوتی و طبقه‌بندها، منابع اصلیِ بخش مبانی موسیقی و نیز پیشنهادهای ارائه‌شده، با یکدیگر مقایسه و تحلیل شده‌اند. همچنین، یافته‌ها، دانش موضوعی، دانش روش‌شناختی و نیز برخی نقاط مثبت و کاستی‌های این متون، مورد بحث قرار گرفته است.

به‌منظور یافتن تمامی متون و منابع موردنظر، کلیدواژه‌های فارسی مرتبط در مهم‌ترین پایگاه‌های اطلاعاتی ایرانی، ازجمله نورمگز، مگ‌ایران، ایران‌داک، علم‌جو و همچنین اُپَک کتابخانه‌های دانشگاهی (شامل فهرست آنلاین جست‌وجوی منابع علمی

[1]. Phrases

[2]. Systematic review

جدول 6. کلیدواژه‌های ترکیبیِ جست‌وجو شده در پایگاه‌های اطلاعاتی فارسی و لاتین

زبان پایگاه	کلیدواژه اول	کلیدواژه دوم)	کلیدواژه سوم	کلیدواژه چهارم
فارسی	شناسایی تشخیص دسته‌بندی طبقه‌بندی کلاس‌بندی کلاسه‌بندی	خودکار بلادرنگ	دستگاه گام قطعات مقام گوشه ردیف	موسیقی ایرانی موسیقی سنتی ایرانی موسیقی سنتی ایران موسیقی کلاسیک ایرانی
انگلیسی	*Classification* *Detection* *Recognition* *Identification*	*Automatic* *Real-time*	*Dastgah* *Modes* *Scales* *Maqam* *Radif*	*Persian music* *Iranian traditional music*

کتابخانه) و همچنین، کلیدواژه‌های انگلیسی در پایگاه‌های استنادی جهانی، ازجمله *Scopus*، *Google Scholar* و *Web of Science* مورد جست‌وجو قرار گرفت. کلیدواژه‌های مرتبط، با مراجعه به متون گوناگون موسیقی ایرانی و منابع بازیابی شده در زمینه شناسایی خودکار موسیقی سنتی ایرانی استخراج شدند (جدول 6).

راهبرد جست‌وجو، بدین ترتیب بود که هر یک از سه یا چهار کلیدواژه اصلی، با عملگر *و* (*AND*) با یکدیگر ترکیب شدند. کلیدواژه دوم، یعنی واژه *خودکار*، در صورت نیاز به این ترکیب اضافه شده است و در بیشتر موارد استفاده نشده است. لازم به ذکر است که در برخی از پژوهش‌ها، بجای واژه خودکار، از کلمه بلادرنگ یا بی‌درنگ نیز استفاده شده است. همچنین، کلیدواژه‌ها و واژگان هم‌خانواده و مترادف، با عملگر *یا* (*OR*) با یکدیگر ترکیب شده و مجموعه آن‌ها در داخل پرانتز قرار گرفتند؛ مانند (شناسایی *OR* تشخیص *OR* دسته‌بندی *OR* طبقه‌بندی). کلیدواژه‌هایی که احتمال می‌رفت در چند شکل مختلف بکار رفته باشند، با استفاده از عملگر ستاره (*) در آخِر ریشه کلمه، امکان بازیابی تمامی حالت‌ها را فراهم می‌کرد. برای مثال، جست‌وجوی عبارت *Detect* منجر به بازیابی واژه‌های *Detection*، *Detecting* و خود واژه *Detect* می‌شود؛ همچنین حالت جمع کلمه‌ها، مانند دستگاه* یا گام* که علاوه بر خود این واژه‌ها، حالت جمع آن‌ها را نیز بازیابی خواهد کرد. در برخی پایگاه‌های استنادی انگلیسی، مانند *Scopus* به‌منظور جست‌وجوی بهتر و رسیدن به نتایج بازیابی دقیق‌تر، امکانِ ترکیبِ حالت‌های مختلف کلیدواژه‌ها در فیلدهای مختلف، از جمله فیلد «عنوان مقاله»، «چکیده»، «کلیدواژه‌ها» و نیز امکان جست‌وجو در هر سه فیلد فراهم بود.

در مدت انجام پژوهش، یعنی ابتدای زمستان 1394 تا پایان تابستان 1397، با ردگیری دیگر متون مرتبط از طریق مراجعه به مراجع و مآخذ آن‌ها و همچنین، جست‌وجوی منظم و در فواصل زمانی معیّن در پایگاه‌های ذکرشده، منابع اطلاعاتی که در این بازه زمانی در این پایگاه‌ها نمایه شده بودند، به‌روزرسانی شدند که در نهایت سیزده منبع مرتبط، بازیابی شده و مورد تحلیل قرار گرفت (پیوست 1).

مطالعاتِ انجام شده

تاکنون پژوهشی در خصوص شناسایی خودکار موسیقی سنتی ایرانی توسط پژوهشگران غیر ایرانی و متخصص در حوزه بازیابی اطلاعات موسیقی، صورت نگرفته است. به نظر می‌رسد دلیل این امر، گنگ و مبهم بودن مسئله و یا ناآشنایی آن‌ها با موسیقی سنتی ایرانی باشد. به‌عبارت‌دیگر، این امر را می‌توان ناشی از شناخته نشدن موسیقی ایرانی به‌صورت گسترده و خارج از ایران دانست؛ به‌نحوی‌که نیاز به انجام چنین پژوهش‌هایی، برای پژوهشگران غیر ایرانی ایجاد نشده است.

همان‌طور که گفته شد، تعداد کل پژوهش‌های انجام‌شده که به‌طور خاص به دسته‌بندی دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی سنتی ایرانی پرداخته‌اند، سیزده مورد بود که یکی از آن‌ها (حیدریان، 1379) تنها به موضوع تعیین فرکانسِ پایه نغمه در یک ساز ایرانی پرداخته و وارد مقوله تشخیص دستگاه و گوشه نشده است.

از بین دوازده پژوهشی که با موضوع دسته‌بندی و تشخیص خودکار دستگاه‌های موسیقی ایرانی انجام شده است، تنها دو مورد در دهه 80 شمسی (دارابی، 1382 و گواهیان چهرمی، 1389) و ده اثر دیگر در نیمه اول دهه 90 شمسی بوده است (پیوست 1). ازاین‌رو، توجه و اقبال به این موضوع، طی چند سال اخیر به‌طور چشمگیری فزونی یافته است؛ اما با نگاهی به فهرست منابع و تاریخ انتشار این پژوهش‌ها، می‌توان دریافت که بیشتر این پژوهش‌ها به‌موازات یکدیگر و به‌طور مجزا انجام شده و بیشتر آن‌ها احتمالاً به دلیل بی‌اطلاع بودن و یا دسترسی نداشتن به منابع مرتبط و مشابه قبلی، از این آثار بهره نجسته‌اند.

از این سیزده مورد، هشت اثر در قالب پایان‌نامه (یک اثر در مقطع کارشناسی، شش اثر کارشناسی ارشد و یک اثر در مقطع دکتری) و مابقی در قالب مقاله (سه اثر مقاله کنفرانسی و دو اثر مقاله نشریه‌ای) بوده است؛ به‌طوری‌که با گذر زمان، تمایل به چاپ اثر در قالب مقاله افزایش پیدا کرده است. همچنین، تخصصِ اصلی ده نفر از نویسندگانِ این آثار، مهندسی برق و الکترونیک بوده است. رشته علمی و تخصصی بقیه پژوهشگران و نویسندگانِ آثار در حوزه مهندسی کامپیوتر، مهندسیِ صدا، مهندسی مکانیک، علوم ریاضی و زیست پزشکی بوده است. طبق بررسی انجام‌شده، بیشتر این پژوهشگران در زمینه مبانی نظری موسیقی سنتی ایرانی اشراف و تسلط لازم و کاملی را نداشته، یا با علم و نوازندگی سازهای موسیقی سنتی ایرانی بیگانه بوده و در بیشتر موارد اطلاعاتِ آن‌ها ناکافی و کم بوده است. بر اساس اطلاعاتِ نویسنده، تنها آقای حیدریان به‌صورت حرفه‌ای در حوزه موسیقی سنتی ایرانی فعالیت و پژوهش می‌کنند.

اولین پژوهش پیشگامی که به ارائه الگوریتم و روشی برای شناسایی و تعیین فرکانسِ پایه نغمه‌های تشکیل‌دهنده قطعات اجراشده به‌وسیله ساز ایرانی در حوزه فرکانس پرداخته است، در سال 1379 توسط حیدریان با عنوان «*بازشناسی نتهای موسیقی برای ساز سنتور*» انجام شده است. بدین منظور، بر اساس مقاله براون[1] (1992) برای هر یک از نغمه‌های گامِ دومِ سنتور یازده خَرَک، یک کلیشه در حوزه فرکانس در نظر گرفته شده و با محاسبه همبستگی بین تبدیل فوریه سیگنال ورودی و تمام کلیشه‌ها (تطبیق کلیشه‌ها**2**)، فرکانس پایه نُت موردنظر شناسایی شده است. به‌عبارت‌دیگر، در این الگوریتم، تابع همبستگی این پژوهش طیف سیگنال ورودی با کلیشه‌های فرکانسی تمامی نغمه‌ها محاسبه شده است. بر این اساس، حاصل هر کدام از این توابع همبستگی که بیشتر بوده، بدین معناست که سیگنال ورودی به کلیشه مربوطه شباهت بیشتری داشته و نت موردنظر بازشناسی شده است. در این پژوهش، با استفاده از میکروفن و کارت صوتی، از هر نغمه، ده نمونه یک‌ثانیه‌ای 16 بیتی (به‌صورت مونو) با فرکانس نمونه‌برداری 8 کیلوهِرتز تهیه شده است. مقدار تئوریک فرکانس پایه نغمه‌ها در این پژوهش بین 138/6 هرتز (نت دو دیز، اُکتاو 1) تا 1396/9 (نت فا، اُکتاو 4) است. از 130 نمونه (برای سیزده نُت)، 96/92 درصد از نمونه‌ها به‌درستی بازشناسی شدند.

پژوهش دارابی (1382) با عنوان «تولید و تجزیه سیگنال‌های دیجیتال موسیقی طراحی زبان برنامه‌سازی نوا به‌منظور تولید قطعات موسیقی و تشخیص خودکار دستگاه‌های موسیقی ایرانی» در دو بخش مجزا انجام شده است که در بخش دوم، به مقوله تشخیص دستگاه‌های موسیقی ایرانی پرداخته است[3]. ازاین‌رو، این اثر نخستین تلاش جدی و مرتبط در زمینه شناسایی و دسته‌بندی دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی به شمار می‌رود. دارابی (1382)، در پژوهش خود، بر اساس فواصل موجود در هر گام موسیقی ایرانی و تجزیه سیگنال‌های دیجیتال، الگوهای عددی به هر یک از این گام‌ها اختصاص داده است. سپس با مقایسه هر قطعه جدید با الگوهای موجود، گام قطعه را تعیین می‌کند. این مقایسه توسط یک ناظر انجام شده و روشی خودکار برای این منظور پیشنهاد نشده است. در مقاله مستخرج از این اثر (دارابی، عظیمی و نجومی[4]، 2006) نیز شناسایی دستگاه و گوشه، بر اساس فاصله بین نغمه‌ها صورت گرفته است که به علت عدم قطعیت فواصل موسیقی ایرانی، برخی ایرادها بدان وارد شده است (بیات، 1392، ص 2).

گواهیان جهرمی (1389) در پژوهش خود با مطالعه روش‌های موجود در تحلیل سیگنال‌های موسیقی غربی و مقایسه آن‌ها، یک روش جدید برای تشخیص مقام‌های مختلف موسیقی ایرانی پیشنهاد داده است و مدعی شده که این روش هیچ محدودیتی برای سازهای موجود در قطعه موسیقی مورد بررسی نداشته و نسبت به روش‌های مشابه، از سرعت بالاتری برخوردار است. در این پژوهش، به‌منظور تشخیص مقام، یک پروفایل پیچ[5] 24 تایی که شامل اطلاعات اساسی در مورد مقام قطعه موردنظر است، از سیگنال صوتی قطعه استخراج شده است.

همچنین، در بخش استخراج ویژگی، یک مرحله کاهش بُعد در الگوریتم اعمال شده که محاسبات را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و موجب افزایش سرعت الگوریتم شده است. نهایتاً، الگوریتم پیشنهادی، به یک پایگاه داده اعمال شده است. بیشترین دقت شناسایی دستگاه، مربوط به ساز نی (90 درصد) و کمترینِ آن، مربوط به ساز ویولن (54/54 درصد) بوده است (ص 95). همچنین، دقت کلی شناسایی دستگاه قطعات، به‌طور متوسط 71 درصد عنوان شده است (ص 94). این در حالی است که دقت شناسایی به تفکیک دستگاه که هدف اصلی انجام این پژوهش بوده، صورت نگرفته است. از طرف دیگر، مبنا و ملاک تقسیم‌بندی تئوریکِ دستگاه‌ها به چهار گام اصلی در موسیقی ایرانی مشخص

[1]. Brown (1992)

[2]. Template Matching

[3]. دو سال پس از انجام این پایان‌نامه، دارابی در مصاحبه‌ای که با سرویس علمی روزنامه جام‌جم (مورخ 1384/4/4) انجام داده، مدعی شده یک نرم‌افزار و برنامه کاربردی را به زبان دلفی طراحی کرده که قادر به تشخیص دستگاه موسیقی (با تکیه بر موسیقی ایرانی) است.

[4]. Darabi, Azimi & Nojumi

[5]. پروفایل پیچ ویژگی‌ای است که فراوانی و توزیع اجزا یا بین‌های فرکانسی نغمات موجود در یک قطعه موسیقی را در یک پنجره زمانی (ترجیحاً بین 20 تا 25 ثانیه) نشان می‌دهد.

جدول 7- توانایی شبکه عصبی در تشخیص دستگاه ماهور از غیرماهور (محمودان، 1390)

ورودی شبکه	خروجی شبکه	نوع تشخیص	دقت شناسایی (درصد)
ماهور	ماهور	TP	73/33
ماهور	غیرماهور	FN	26/67
غیرماهور	غیرماهور	TN	86
غیرماهور	ماهور	FP	14

نشده و اساساً اشتباهاتی در آن دیده می‌شود؛ برای مثال، آواز دشتی که از متعلقات دستگاهِ شور است، مشخص نیست که به چه دلیل در کنار دستگاه ماهور و راست‌پنجگاه قرار گرفته است.

پژوهش محمودان با عنوان «دسته‌بندی خودکار نشانه‌های صوتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی» در سال 1390 و در رشته مهندسی صدا انجام شده که یک سال پس از این تاریخ، مقاله مستخرج از آن در دومین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، با عنوان «دسته‌بندی خودکار گام ماهور موسیقی ایرانی توسط یک شبکه عصبی مصنوعی»، در دانشگاه شریف ارائه شده است. در این مقاله (محمودان و بنوشی، 1391) ادعا شده که می‌توان سامانه‌ای را طراحی کرد که به‌صورت خودکار دستگاه ماهور را از دستگاه‌های غیرماهور تمیز دهد. بدین منظور سه دستگاه و دو آواز موسیقی ایرانی (شامل ماهور *دو*، چهارگاه *دو*، سه‌گاه *می کُرُن*، شور *سُل*، بیات‌ترک *دو* و بیات‌اصفهان *دو*) مورد بررسی قرار گرفته است. برای دسته‌بندی قطعات موسیقی سنتی ایرانی، از شبکه عصبی مصنوعی (احتمالاً برای نخستین بار) با توابع پایه شعاعی[1] استفاده شده است. دلیل انتخاب چنین مُدلی، اولاً داشتن تنها یک لایه پنهان عنوان شده است که نیازی به آزمون‌وخطا برای رسیدن به تعداد لایه مناسب ندارد و دوماً نسبت به دیگر مُدل‌ها (مانند پرسپترون چندلایه و مادلاین) سریع‌تر آموزش می‌بیند (همان، ص 7)؛ البته دلیل اول چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. ضمن آنکه باید توجه داشت که در این پژوهش، شناسایی خودکار دیگر دستگاه‌ها، آوازها و گوشه‌های موسیقی ایرانی بررسی نشده است.

بسامد بیست قله برتر نخست بیناب هر قطعه موسیقی به‌عنوان الگوی ورودی شبکه برگزیده شده است. در این روش از 135 داده (تنها درآمد دستگاه‌ها) برای آموزش و 60 داده برای آزمون شبکه استفاده شده است. داده‌های لازم برای آموزش و آزمایشِ شبکه در یک استودیوی رادیویی توسط یک نوازنده سه‌تار اجرا و ضبط شده است[2]. در نهایت، این شبکه عصبی توانسته قطعه‌های نواخته شده در گام ماهور را با دقتی بیش از 70 درصد از قطعه‌های نواخته شده در سایر گام‌ها به‌درستی شناسایی کند (جدول 7)[3]. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که اطلاعات مربوط به گام یک موسیقی ایرانی در بیناب (فرکانس) بسامدی آن نهفته و قابل استخراج است؛ بنابراین، یکی از دستاوردهای پژوهش محمودان و بنوشی، آشکارسازی اطلاعاتی در طیف فرکانسی قطعات دستگاه‌های موسیقی ایرانی (در این پژوهش ماهور) عنوان شده است که می‌تواند مرجعی برای تمایز دستگاه‌های موسیقی ایرانی توسط یک سامانه تشخیص خودکار باشد.

بیات (1391) در پژوهش خود با عنوان «کلاس‌بندی نوع و شناسایی دستگاه در موسیقی ایرانی»، ادعا می‌کند که با استفاده از روشی برای بازشناسی نغمه و سپس تحلیل زمانی- فرکانسی قطعه موسیقی، می‌توان دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی ایرانی (به‌عنوان کلاس‌های موسیقی ایرانی) را شناسایی کرد؛ به‌این‌ترتیب که نغمه‌ها با استفاده از یک شانه یا پنجره فرکانسی، شامل فرکانس پایه هر نغمه و سه هارمونیک اصلی آن بازشناسی شده و هر دستگاه و گوشه نیز، با توجه به فراوانی نغمه‌های نواخته در قطعه موسیقی، شناسایی شده است. طول پنجره‌های زمانی، برای تحلیل فرکانسی، 0/1 ثانیه (100 میلی‌ثانیه) در نظر گرفته شده است؛ با این استدلال که بر اساس تجربه، هر چقدر هم ارزش زمانی آن کوتاه باشد، در این فاصله زمانی بیش از یک نغمه اجرا نخواهد شد. پایگاه داده جمع‌آوری‌شده برای تشکیل بُردارهای تتراکورد یا پنتاکورد، بر اساس آلبوم صوتی «ردیف موسیقی استاد ابوالحسن صبا»، ویرایش فرامرز پایور بوده که توسط آقای سعید ثابت اجرا و ضبط شده است (بیات، 1391، ص 73). همچنین، تعداد 80 گوشه در دستگاه شور و آواز افشاری برای آموزش و آزمون در روش شبکه عصبی انتخاب شده است که از این تعداد 10 گوشه برای آموزش شبکه و بقیه گوشه‌ها برای تست استفاده شده‌اند. در این پژوهش، شناسایی نغمه در دو حالت کلی تک‌مضراب[4] و در داخل قطعه موسیقی بررسی شده است (1391، ص 82). لازم به ذکر است که نتیجه چنین بررسی‌ای اساساً از ارزش زیادی

[1]. RBF (Radial Basis Functions)

[2]. قطعات توسط میکروفن خازنی AkG C451-EB، میکسر صدای Studer Onair و نرم‌افزار Adobe Audition با نرخ بیت 16، به صورت مونو و به فرمت mp3 در استودیوی رادیو البرز ضبط شده که برای پردازش در متلب، به فرمت Wav تبدیل شده است.

[3]. چهار نوع تشخیص در این روش، عبارتند از:
True Positive (TP)، False Negative (FN)، True Negative (TN) و False Positive (FP)

[4]. به تعبیر غلط پژوهشگر، به جای واژه «تک‌مضراب» از واژه «تک‌صدایی» استفاده شده است.

برخوردار نیست، چرا که یک قطعه موسیقی از نغمه‌های متوالی و با فاصله زمانیِ نسبتاً کوتاه ساخته شده‌اند و نه به‌صورت تک‌مضراب.

پژوهش عبدالله‌زادگان (1393)، با عنوان «دسته‌بندی خودکار قطعات موسیقی سنتی ایرانی بر پایه دستگاه»، بر اساس تئوری علی‌نقی وزیری، پنج گام متداول (بر اساس تئوری وزیری) در دستگاه‌های موسیقی سنتی و از هر گام، دو مایهٔ (تُنالیتهٔ[1]) راست‌کوک و چپ کوک و در مجموع ده کلاس شامل: ماهور (دو و سُل)، شور (سُل و ر)، چهارگاه (دو و سُل)، سه‌گاه (می کُرُن و لا کُرن) و همایون (سُل و ر) را بررسی کرده است. پردازش‌ها بر روی 46 قطعه (42 قطعه با تار و 4 قطعه با سنتور) و در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده است. قطعات به‌صورت کامل اجرا شده‌اند و بر روی آن‌ها بُرش انجام نشده است. دقت کلی عملکرد سیستم در روش پیشنهادی این پژوهش، 93 درصد بوده است[2]؛ اما دقت شناسایی، به تفکیک هر یک از پنج دستگاه و ده مایه (تُنالیته[3]) ذکرشده، بررسی نشده است.

در پژوهش دارابی، عظیمی و نجومی (2006)، امکان استفاده از فنون تشخیص الگو[4]، از طریق اندازه‌گیری تشابه بینِ قطعه موسیقی با ملودی مُدل‌های اصلی (درآمد اول) هر یک از دوازده دستگاه، با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه[5]، مطرح شده است. روش‌شناسی این پژوهش، همانند روش بکار رفته در پایان‌نامه دارابی است که سه سال پیش از چاپ این مقاله، یعنی در سال 1382 انجام شده است. در این پژوهش، تنها دستگاه همایون مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود آنکه اندازه‌گیری شباهتِ قطعه موسیقی داده شده با ملودی-مُدل شِماتیک[6]، هدف اصلی این پژوهش بوده است، اما در عمل، در تمایز ملودی مُدل‌ها ناتوان بوده است.

پژوهش بعدی توسط عبدلی[7] با عنوان «طبقه‌بندی دستگاه موسیقی سنتی ایرانی» انجام شده که در دوازدهمین کنفرانس انجمن بین‌المللی بازیابی اطلاعات موسیقی در سال 2011 (برابر با 1390 شمسی) به چاپ رسیده است[8]. منطق فازی نوع دوم[9] به‌عنوان طبقه‌بند دستگاه‌ها استفاده شده است. بدین ترتیب که هر نغمه اجرا شده، به‌عنوان یک «مجموعه فازی[10]» در نظر گرفته شده است؛ بر این اساس، هر گوشه یا قطعه موسیقی، مجموعه‌ای خاص از مجموعه‌های فازی[11] است. بیشترین شباهت بین این مجموعه و داده‌های برگرفته از مبانی نظری فواصل گام‌ها در موسیقی ایرانی، مبیّن دستگاه موردنظر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، بر اساس دیدگاه وزیری، در مجموع پنج دستگاه اصلی مورد بررسی قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که به خاطر یکسان بودن فواصل، دستگاه شور با نوا در یک گام و همچنین ماهور با راست‌پنجگاه در گامی یکسان بررسی شده‌اند. مجموعه اصلی داده این پژوهش، تک‌خوانی آوازی[12] از اساتید قدیمی و مطرح کشور (محمود کریمی: 69 قطعه، عبدالله دوامی: 57 قطعه، محمدرضا شجریان: 20 قطعه و 21 قطعه از مقام‌های عربی[13]) است. همچنین، از تعداد کمی فایل صوتی تک‌نوازی از سازهای سنتور، تار، سه‌تار و کمانچه نیز استفاده شده است که درمجموع شامل 210 قطعه است. از این تعداد، 89 قطعه در دستگاه شور و نوا، 41 قطعه در دستگاه ماهور و راست‌پنجگاه، 30 قطعه در سه‌گاه، 26 قطعه در همایون و 24 قطعه در چهارگاه است. بر اساس نتایج این پژوهش، دقت کلی شناسایی دستگاه‌ها 85 درصد بوده است.

حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری[14] (2012) در پژوهشی که با عنوان «طبقه‌بندی بلادرنگ دستگاه‌های موسیقی ایرانی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی» انجام داده‌اند (همانند پژوهش عبدالله‌زادگان، 1393، عبدلی 2011) متأثر از مبانی نظری موسیقی وزیری، یک اُکتاو را به 24 نغمه بالقوه[15] قابل تقسیم دانسته و تعداد کل گام‌های موسیقی سنتی ایرانی را به پنج دستگاه (شور، همایون، سه‌گاه، چهارگاه و ماهور) تقلیل داده‌اند. در این پژوهش، با استفاده از شبکه عصبی، 120 گام و دستگاهِ بالقوه، آموزش داده شده که نهایتاً منجر به طبقه‌بندی پنج دستگاه، مستقل از نغمه

---

[1]. Tonality

[2]. در این پژوهش، دقتِ شناسایی دستگاه با استفاده از سه روش دیگر، یعنی شبکه عصبی (61/20 درصد)، روش KNN (73/36 درصد) و روش Naive Bayes (84/32 درصد) نیز بررسی شده است.

[3]. اگر دو قطعه مختلف از یک دستگاه با نغمه شاهد متفاوت نواخته شوند (برای مثال ماهور دو و ماهور سُل)، با وجود آنکه هر دو، الگوی یکسانی در ترکیب گام (دستگاه) دارند، اما به دلیل وجود نغمه «فا دیز» در ماهور سُل، این سامانه نمی‌تواند آن را در دستگاه ماهور طبقه‌بندی کند و در واقع به تُنالیته حساس است. یا مثلاً تفاوت تُنالیته شورِ سُل با تُنالیته شور دو، در شروع نغمه و درجه اول (نغمه شاهد) آنهاست؛ وگرنه نسبت فواصل آنها یکسان است.

[4]. Pattern recognition techniques

[5]. STFT (Short Time Fast Fourier)

[6]. Skeletal melodic model

[7]. Abdoli (2011)

[8]. *12th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2011)*

[9]. منطق فازی نوع 2 (Fuzzy logic type 2) که توسعه یافته منطق فازی نوع 1 است، وقتی که داده‌ها در عمل مبهم یا ناکافی هستند، می‌تواند عدم قطعیت را توصیف کند (عبدلی، 2011، ص 277).

[10]. FS (Fuzzy set)

[11]. A set of FSs

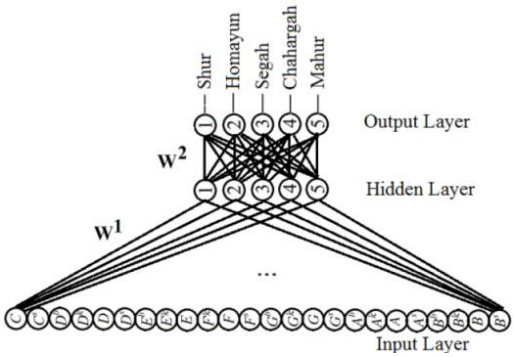
[12]. Vocal

[13]. به این دلیل که الگوی فواصل برخی مقام‌های عربی، به دستگاه‌های ایرانی شباهت دارد. برای مثال، مقام عَجَم در موسیقی عربی، به دستگاه چهارگاه شباهت دارد (عبدلی، 2011، ص 279).

[14]. Hajimolahoseini, Amirfattahi & Zekri

[15]. در این پژوهش، عبارت Root Notes معادل هر یک از 24 نغمه اصلی گام بالقوه (در موسیقی ایرانی) عنوان شده است که در واقع، معادل نغمه شاهد (تونیک) هر دستگاه (گام) است.

شاهد شده است. بر اساس الگوی فواصل هر دستگاه، عدد 1 بیانگر وجود و عدد 0 بیانگر نبود نغمه‌هایی است که در یک گام بکار رفته است. در این شبکه عصبی سه‌لایه‌ای، 24 نورون (واحد) در لایه اول (لایه ورودی)، 5 نورون در لایه مخفی و 5 نورون در لایه سوم (لایه خروجی) قرار دارد که هر نورون ورودی را یکی از نغمه‌های 24 تایی گام بالقوه تشکیل داده است (تصویر 1).



تصویر 1. ساختار سه لایه شبکه عصبی
(منبع: حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذکری، 2012، ص 158)

در پژوهشی که توسط عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم به زبان انگلیسی و در سال 1392 شمسی (2013 میلادی) انجام شده[1]، به‌منظور طبقه‌بندی (دسته‌بندی) ردیف میرزاعبدالله، ابتدا چهار ویژگی طیفی و فرکانسی، شامل مؤلفه‌های غیرهارمونیک، ضرایب مِل، نواک، میانگین و انحراف استانداردِ مرکز ثقل طیفی، بر روی فایل‌های صوتی اعمال شد. لازم به ذکر است که ویژگی‌های زمانی در این پژوهش استفاده نشده است. سپس برخی الگوریتم‌های نظارت‌شده یادگیری ماشین[2] که معمولاً در دسته‌بندی سبک (ژانر) موسیقی از آن‌ها استفاده می‌شود، مانند پرسپترون چندلایه[3]، نزدیک‌ترین مجاور k[4] و ماشین‌های بردار پُشتیبان[5] بر روی فایل‌های صوتی 3 ثانیه‌ای بکار گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ماشین‌های بردار پُشتیبان، برای دسته‌بندی سبک موسیقی (و به تبعیت از آن برای دسته‌بندی دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی) از دیگر روش‌های یادگیری آماری، ازجمله دو الگوریتم یادشده و دیگر روش‌های سنتی مبتنی بر فاصله اقلیدسی[6] به‌مراتب بهتر بوده و از دقت بیشتری برخوردار است (عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم، 2013، ص 64). از میان چهار تابع هسته[7] ماشین‌های بردار پُشتیبان (یعنی *linear*، *Quadratic*، *Poly Order3* و *RBF*) نیز، طبقه‌بند و شبکه *RBF* در مجموع نتایج بهتری برای دسته‌بندی دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی دربر داشت؛ شاید به این دلیل که این نوع شبکه‌ها، وابستگی بیشتری به مرکز خوشه‌ها دارند.

در پژوهش بیگ‌زاده و بلالی کوچ اصفهانی[8] (2016) هفت دستگاه دستگاه موسیقی ایرانی (شور، همایون، سه‌گاه، چهارگاه، ماهور، نوا و راست‌پنجگاه) برای دو ساز نی و ویولن و نیز آواز مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از اعمال تبدیل فوریه سریع بر روی فایل‌های صوتی، کلیه ماکزیمم‌های محلی مرتبط با نسبت فواصلِ 5001 بدست آمده است. ازآنجاکه این عدد برای تعداد ویژگی‌هایی که به‌عنوان ورودی شبکه عصبی است مناسب نیست، کل بازه فرکانسی به 20 پنجره تقسیم و مقدار ماکزیمم مطلق برای هر پنجره استخراج شده است. ازاین‌رو، برای هر قطعه موسیقی، این 20 مقدار به‌عنوان ویژگی در نظر گرفته شد. سپس، این ویژگی‌ها در دو ماتریس جداگانه آموزش و تِست (آزمون) ذخیره و به‌عنوان داده‌های ورودی شبکه عصبی، با استفاده از روش پرسپترون چندلایه (با دو لایه مخفی) و یادگیری نظارت‌شده استفاده شده‌اند. به‌عبارت‌دیگر، مشابه پژوهش محمودان (1390)، ماتریس‌های آموزش و آزمون که شامل 20 ماکزیمم محلی طیف (فواصل) فرکانسی است، به‌عنوان ورودی به شبکه در نظر گرفته شده است (ص 112 و 113). همچنین روش‌های پس‌خورد[9] و پرسپترون برگشتی[10] در شبکه‌های عصبی نیز مورد بررسی قرار گرفت. بیست قله برترِ[11] طیف فرکانسیِ هر یک از قطعات اجراشده در سه طبقه نی، ویولن و آواز، به‌عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که شبکه عصبی آموزش‌دیده با روش پرسپترون چندلایه، قادر است دستگاه‌ها را با دقت کُل 65 درصد (برای ساز نی، 72 درصد برای ساز ویولن و 56 درصد برای آواز) تشخیص دهد. از طرف دیگر، نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد و دقت شناسایی دستگاه موسیقی ایرانی، به میزان زیادی به کیفیت داده‌های ورودی نیز بستگی دارد (همان، ص 113) و با افزایش هزینه محاسباتی، یعنی با افزایش تعداد نورون‌های لایه پنهان از 10 به 60 (با گام[12] ده‌تایی)، عملکرد شبکه در آموزش داده‌ها نیز افزایش، اما دقت دسته‌بندی داده‌های آزمون کاهش یافته است (ص 113 و 116).

---

[1]. Abbasi Layegh, Haghipour & Najafi Sarem
[2]. Supervised Machine Learning Algorithms
[3]. MLP (Multi-layer perceprton)
[4]. KNN (k-nearest neighbor) classifier
[5]. SVM (support vector machine)
[6]. Traditional Euclidean distance based methods
[7]. Kernel functions

[8]. این مقاله (Beigzadeh & Belali Koochesfahani, 2016) برگرفته از پروژه تحقیقاتی آقای مجتبی بلالی کوچ‌اصفهانی با عنوان «دسته‌بندی هوشمند دستگاه‌های موسیقی ایرانی به کمک شبکه‌های عصبی» بوده که در سال 1392 در دانشگاه علم و صنعت انجام شده است.
[9]. Feed-forward
[10]. backward perceptron
[11]. Top peaks
[12]. Step

حیدریان (2016) در پژوهش خود، به‌منظور شناسایی پنج دستگاه اصلی موسیقی ایرانی، ابتدا پایگاه داده‌ای[1] از فایل‌های صوتی موسیقایی را تشکیل داده و سپس، بر روی این نمونه‌ها، تحلیل صورت گرفته و الگوریتم‌های مربوطه توسعه یافته‌اند. بخش عمده پایگاه داده در این پژوهش را ساز سنتور تشکیل می‌دهد که قسمتی از آن، توسط پژوهشگر اجرا شده است. همچنین، انحرافِ هارمونیک و ضریب ناهماهنگی[2] برای این ساز اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش، سه ویژگی اصلی میانگین طیفی، کروما و هیستوگرام پیچ (نواک)، از فایل‌های صوتی استخراج شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. به‌منظور تشکیلِ بردار ویژگی و عدم وابستگی شناسایی دستگاه موسیقی به تغییر مایه (تُنالیته) در آن دستگاه، الگوریتم تشخیص تونیک (نت شاهد) ایجاد و توسعه یافته است. در مرحله بعد، فاصله هندسی، مانند فاصله مَنهتن[3] و همبستگی متقابل[4] و یک روش یادگیری ماشین (مدل‌های ترکیبی ترکیبی گوسیان یا *GMM*) به‌منظور اندازه‌گیری شباهت بین یک سیگنال و هر یک از شابلون‌های فرکانسی استفاده شد. در مرحله آموزش داده‌ها، برای هر یک از پنج دستگاه در موسیقی ایرانی، یک شابلون فرکانسی بر اساس الگوهای برگرفته از داده‌های حقیقی ایجاد شده است. همچنین، در این پژوهش، تأثیر هر یک از پارامترهای زیر، بر روی شناسایی و تشخیص نغمه و دستگاه بررسی و ارزیابی شده است: مقدار داده‌های آموزشی، بازه فرکانسیِ بکار رفته برای مرحله آموزش داده‌ها، کاهش فرکانس نمونه‌برداری[5]، رزولوشن نغمه (در هر یک از سیستم‌های مختلف تعدیل گام به 12، 24، 48 و 53 قسمت مساوی)، تأثیر اعمال همپوشانی بر روی پنجره‌ها و نیز اعمال فیلترینگ در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، برای حذف نویز یا هارمونیک‌هایی که انرژی بالایی دارند.

یافته‌ها

در این قسمت جوانب مختلفِ پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص شناسایی خودکار دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی، از جمله چارچوب و محدوده پژوهش‌ها، نوع پایگاه داده، ویژگی‌های صوتی و طبقه‌بندها، منابع اصلیِ بخش مبانی موسیقی، پیشنهادهای ارائه شده و نیز برخی نقاط مثبت و کاستی‌ها، بررسی شده است.

- پایگاه داده

به دلیل نبودِ پایگاه داده مرتبط و استاندارد برای موسیقی سنتی ایرانی، پژوهشگران خود پایگاه داده‌ای را به‌صورت سلیقه‌ای و پراکنده ایجاد کرده‌اند. برای مثال، پیوندی (1394) پایگاه داده‌ای بر اساس 180 گوشه از آلبوم آموزشی «هفت دستگاه موسیقی سنتی»، به نوازندگی سنتور توسط مجید کیانی، ایجاد کرده است. سپس به‌منظور استانداردسازی داده‌ها، با الگو گرفتن از پایگاه داده *GTZAN*[6]، این گوشه‌ها به 330 قطعه 30 ثانیه‌ای بُرش داده شده‌اند. این درحالی‌که است پژوهشگران دیگر، آلبوم‌های متنوعی را برای بررسی برگزیده و یا خود به ضبط قطعات اقدام کرده‌اند. برای مثال، پایگاه داده استفاده شده در پژوهش گواهیان جهرمی (1389)، شامل مجموعه‌ای متنوع از انواع نمونه‌های موسیقی سنتی ایرانی ضبط شده (در مجموع 179 قطعه: 55 قطعه برای تار، 31 قطعه برای سه‌تار، 26 قطعه برای گروه‌نوازی، 21 قطعه برای سنتور، 20 قطعه برای نی، 15 قطعه برای کمانچه و 11 قطعه برای ویولن) است[7] که به‌صورت لوح فشرده و کاست منتشر شده است.

همچنین، در پژوهش‌های مرتبط با شناسایی خودکار موسیقی سنتی ایرانی، طول بُرشِ قطعات تقریباً به‌طور سلیقه‌ای انجام شده است. بیات در پژوهش خود (1391، ص 84) ادعا می‌کند که «به‌منظور تعیین دستگاه و گوشه موسیقی ایرانی، حداقل باید یک دقیقه از آن را تحلیل و بررسی کرد، زیرا بسیاری از گوشه‌های موسیقی، به‌خصوص دستگاه شور و متعلقات آن شباهت زیادی باهم دارند». چنین ادعایی چندان دقیق به نظر نمی‌رسد و طرح آن، نیاز به تحلیل عمیق و دقیق توسط ردیف‌شناسان موسیقی ایرانی دارد تا بتوان در مرحله اول وجه تمایزِ هر یک از گوشه‌ها را بازشناخت.

فرکانس نمونه‌برداری در بیشتر پژوهش‌های شناسایی خودکار موسیقی ایرانی، 44 هزار هرتز انتخاب شده است و فرمتِ قطعات ضبط شده بیشتر در قالبِ wav یا mp3 بوده است؛ اما در دیگر شرایط اخذ سیگنال، از جمله شرایط ضبط و طول بُرشِ قطعات موسیقی، انتخابِ طول پنجره و نیز نوع ساز، تفاوت معناداری مشاهده شده و یکدستی در آن‌ها وجود ندارد (پیوست 1). این

---

[1]. Dataset
[2]. Harmonic deviation and Inharmonicity factor
[3]. Manhattan distance
[4]. Cross correlation
[5]. Down sampling

[6]. پایگاه داده موسیقی GTZAN که در سال 2001 توسط جورج زانِتاکیس (Tzanetakis, 2015) به بازار عرضه شد و نسبت به دیگر پایگاه‌های مشابه، از محبوبیت بیشتری برخوردار است، شامل صد فایل و قطعه صوتی در هر یک از ده سَبک موسیقی (شاملِ کلاسیک، دیسکو، هیپ‌هاپ، بلوز، پاپ، کانتری، جاز، راک، متال و راگا) و جمعاً شامل هزار قطعه موسیقی با مدت زمان بُرش‌داده شده یکسان (به طول 30 ثانیه) است.

[7]. گواهیان جهرمی (1389) از تنوع در نوع و فرمت ضبط آرشیوهای صوتی موجود، به عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش خود نام برده است.

درحالی است که با ایجادِ پایگاه داده‌ای جامع و منسجم برای موسیقی سنتی ایرانی، می‌توان این مشکل را برطرف نمود؛ چنانکه نمونه اینگونه پایگاه‌ها برای موسیقی غربی موجود بوده و در پژوهش‌های بازیابی اطلاعاتِ موسیقی، به‌دفعات مورد استفاده قرار گرفته است. چهار نمونه از پایگاه داده استاندارد و جامع در موسیقی غربی، عبارت‌اند از: *MASS*[1]، *DSD100*[2]، *GTZAN* و *MIR-1K*.

- چارچوب و محدوده پژوهش‌ها

چارچوبِ پژوهش‌ها را می‌توان در پنج مقوله کلی جای داد: تعداد دستگاه‌ها و گوشه‌های بررسی‌شده، شیوه اجرا، نوع ساز، نوع کوک و مایه (تُنالیته[3]). برخی پژوهش‌ها بر روی تعداد محدودی دستگاه متمرکز شده‌اند؛ مانند پژوهش محمودان (1390) که تنها درآمدِ دستگاه ماهور و نه دیگر گوشه‌های این دستگاه و دیگر دستگاه‌ها را بررسی کرده است. در بیشتر پژوهش‌ها، تفکیکِ پنج دستگاه اصلی از یکدیگر، هدف اصلی پژوهش بوده و به شناسایی و تشخیص گوشه‌ها از یکدیگر پرداخته نشده است.

شیوه اجرایِ بیشتر پژوهش‌ها، به‌صورت ساده‌نوازی و پرهیز از طرزِ بیانیِ سخت و اجرای تکنیک‌های پیچیده نوازندگی مانند زینت‌ها، تریوله، تِرمولو، تکیه، ریز، دُرّاب، گلیساندو[4]، استِکاتو (لگاتو) و ویبراسیون[5] بوده است. همچنین، علاوه بر بافتِ تک‌صدایی[6] که از ویژگی‌های موسیقی سنتی ایرانی است، تمامیِ قطعات به‌صورت تک‌نوازی اجرا شده‌اند، به‌طوری‌که نه آواز، نه سازِ زهی و نه ساز کوبه‌ایِ دیگری آن را همراهی کرده است[7].

نوع ساز در بیشتر پژوهش‌ها زهی و از نوعِ زخمه‌ای بوده است؛ به‌جز پژوهش عبدلی (2011) که ساز کمانچه (به‌عنوان ساز زهیِ آرشه‌ای) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، پژوهش عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم (2013) و بیگ‌زاده و بلالی کوچاصفهانی (2016) که برخی گوشه‌های آواز، نی و ویلن را نیز در پایگاه داده خود استفاده کرده‌اند. نتایج پژوهش مؤخرتر نشان داد که شناسایی خودکار در موسیقی سنتی ایرانی برای موسیقی آواز سخت‌تر از موسیقی سازی است، چرا که مقدار ضریب ناهماهنگی در یک قطعه موسیقیِ آوازی، بسیار بیشتر از قطعه مشابهی است که با ساز زهی نواخته شده است (بیگ‌زاده و بلالی کوچاصفهانی، 2016، ص 112).

ازاین‌رو، سامانه‌های طراحی شده در این آثار، به نوع ساز حساس است؛ بدین معنا که اگر همین پژوهش‌ها عیناً با ساز دیگری غیر از ساز بررسی شده اجرا شوند، احتمالاً به دلیل تفاوت طنین در سازهای مختلف و تأثیر آن در پوش فرکانسی هر نغمه و طیف فرکانسی قطعات، نتایج متفاوتی به دست خواهد آمد.

این حساسیت در خصوص نوع کوک و مایه نیز وجود دارد؛ یعنی چنانچه کوک ساز اندکی تغییر یابد (مثلاً اگر دیاپازن کوک شده نیم‌پرده بَم‌تر شود)؛ و یا اگر یک گوشه خاص از دستگاه واحد در مایه‌های متفاوت اجرا شوند[8] (برای مثال درآمد اول یک‌بار در ماهورِ دو و بار دیگر در ماهورِ فا اجرا شود)، درصد خطای سامانه و شبکه طراحی شده افزایش یافته و ازاین‌رو، شناسایی دستگاه به‌درستی انجام نخواهد شد.

- منابع اصلیِ مبانی نظری موسیقی سنتیِ ایرانی

بررسی و تحلیلی منابعی که در آن‌ها مبانی نظری موسیقی سنتیِ ایرانی مطرح شده، ازآن‌رو اهمیت دارد که جهت‌گیری کلی (پارادایم) و رویکردِ پژوهش‌های مرتبط با شناسایی دستگاه موسیقی ایرانی را مشخص خواهد کرد. کتاب هرمز فرهت (1990)[9] را می‌توان تأثیرگذارترین منبع در این نوع پژوهش‌ها دانست[10]؛ چرا که بیشتر این آثار، در بخش مبانی نظری موسیقی و نیز تعاریف موسیقایی خود از این منبع بهره جسته‌اند (از جمله دارابی، 1382؛ عبدالله‌زادگان، 1393؛ دارابی، عظیمی و نجومی، 2006؛ عبدالی، 2011؛ حاجی‌مُلاحسینی، امیرفتاحی و ذکری، 2012؛ عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم،2013؛ بیگ‌زاده و بلالی کوچاصفهانی، 2016 و حیدریان، 2016). پس از این اثر،

---

[1]. Music Audio Signal Separation

[2]. Demixing Secrets Dataset

[3]. در پژوهش محمودان و بنوشی (1391، ص 9) بجای واژه تُنالیته یا مایه، به اشتباه از واژه «سرکلید» استفاده شده است.

[4]. حرکت پیوسته بین دو فرکانس

[5]. لرزش متناوب فرکانس

[6]. Monophonic

[7]. بجز بخش کوچکی از پایگاه داده پژوهش حیدریان (2016، ص 51) و گواهیان جهرمی (1389) که به صورت گروه‌نوازی انتخاب شده‌اند.

[8]. برای مثال در پژوهش حیدریان (2016) تنها شش مایه (یا تُنالیته) شور (در مایه می و لا)، اصفهان و چهارگاه لا، سه‌گاه (فا سُری)، ماهور (سُل) بررسی شده است.

[9]. Farhat (1990)

[10]. هرمز فرهت، آهنگساز، استاد برجسته دانشگاه کالیفرنیا در لُس‌آنجلس (1968-1959)، مدیر گروه و استاد گروه موسیقی دانشگاه تهران (1976-1968)، رئیس دانشگاه موسیقی دابلین در ایرلند (2000-1979) پایان‌نامه دوره دکتری خود را در خصوص «دستگاه در موسیقی ایرانی» در دانشگاه کالیفرنیا (از سال 1955 تا 1965)، نگاشته است. این اثر که حاصل ده سال پژوهش بوده و همچنان یکی از قابل‌قبول‌ترین و تأثیرگذارترین نظریه‌های موسیقی سنتی ایران است، در سال 1990 میلادی توسط انتشارات دانشگاه کمبریج به زبان انگلیسی و سپس در سال 1380 شمسی توسط انتشارات پارت، با ترجمه فارسی مهدی پورمحمد منتشر شد. در این اثر، ضمن رد نظریه‌های وزیری و برکشلی در خصوص تعدیل نمودن گام بالقوه در موسیقی ایرانی، نظریه «فواصل انعطاف‌پذیر» را مطرح نمود. وی همچنین، با ارائه دلایلی، عنوان دستگاه را به همه 12 سیستم مقامی اطلاق می‌کند و معتقد است که هر یک از دستگاه‌های ردیف موسیقی ایرانی، از انگاره‌های ساختاری ملودیک تشکیل شده‌اند که این انگاره‌ها، هدایت‌گر و عامل پیوند میان هنر نوازندگی و هنر آفرینش موسیقی (بداهه‌نوازی) به شمار می‌روند.

کتاب «تئوری موسیقی» اثر علینقی وزیری[1] (گواهیان جهرمی، 1389 و عبدالله‌زادگان، 1393)، کتاب تأمل‌برانگیزِ «گامهای گمشده» اثر مرتضی حنانه (دارابی، 1382) و «نظری به موسیقی ایرانی» اثر روح‌الله خالقی[2] (دارابی، 1382) به‌عنوان منابع مهم و تأثیرگذار موسیقی ایرانی، در پژوهش‌های شناسایی دستگاه بوده‌اند. بااین‌وجود، بیشتر این پژوهش‌ها در عمل و برای تشخیص دستگاه‌ها از یکدیگر، دیدگاه علی‌نقی وزیری را مبنای نظری موسیقی سنتی خود قرار داده‌اند. به‌عبارت‌دیگر، بر اساس این دیدگاه که موسیقی سنتی ایرانی را به پنج دستگاه کلی (شور، سه‌گاه، چهارگاه، ماهور و همایون) قابل تقسیم می‌داند، تلاش شده تا تنها بر اساس اِشِل صوتی و ساختار فواصل منحصربه‌فرد هر یک از چهار یا پنج دستگاه اصلی، آن‌ها را از یکدیگر تفکیک کنند.

باوجودآنکه در اثر فرهت، الگوی ملودیک برخی از گوشه‌ها تا حدودی مورد بررسی قرار گرفته است، اما بر این اساس، در هیچ‌یک از پژوهش‌ها عملاً تلاشی برای تفکیک آوازها و گوشه‌ها از یکدیگر صورت نگرفته است. آناتومی گوشه‌ها و بررسی دقیق‌تر جملات مختلف گوشه‌ها، در کتاب «تحلیل ردیف» از داریوش طلایی انجام شده که نخستین بار در سال 1394 منتشر شده است. بدین معنا که هیچ‌یک از پژوهش‌های مرتبط با شناسایی خودکار موسیقی سنتی ایرانی، از این منبع استفاده نکرده‌اند. به باور پژوهشگر، از طریق بررسی سیر ملودی جملات مُعرِّف گوشه‌ها که در اثر طلایی مطرح شده است، شناسایی و تفکیک گوشه‌ها از یکدیگر امکان‌پذیر است.

- ویژگی‌های صوتی و طبقه‌بندها

محمودان و بنوشی (1391، ص 6) معتقد هستند که از بین سه ویژگیِ نواک (فواصل فرکانسی)، ریتم و طنین، تنها ویژگی نواک در تعیین دستگاه‌های موسیقی ایرانی نقش دارد. ازاین‌رو، مهم‌ترین پردازشی که بر روی داده‌های خام باید انجام داد، به دست آوردن طیف فرکانسی (با استفاده از تبدیل فوریه سریع) و پیدا کردن فرکانس‌های غالب قطعه است. به نظر می‌رسد بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده نیز به این مسئله واقف بوده و در اولین مرحله از شناسایی دستگاه، یعنی آشکارسازی و تشخیص نغمه‌ها، تنها از همین ویژگی استفاده کرده‌اند (محمودان، 1390؛ بیات، 1392؛ عبدالله‌زادگان، 1393؛ دارابی، عظیمی و نجومی، 2006؛ عبدلی، 2011؛ حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذکری، 2012 و بیگ‌زاده و بلالی کوچ‌اصفهانی، 2016). بیات (1392) نیز در پژوهش خود، نواک (پیچ فرکانسی) را اصلی‌ترین ویژگی برای تشخیص نغمه‌های بکار رفته در یک گوشه یا قطعه و درنتیجه طبقه‌بندی خودکار موسیقی عنوان کرده است. وی پس از تعیین قله‌های برتر به‌عنوان پیچ فرکانسی، بردار ویژگی را بر اساس پنج نغمه پُرتکرار یک گوشه تشکیل داده است. در پژوهش محمودان (1389) و بیگ‌زاده و بلالی کوچ‌اصفهانی (2016) بردار ویژگی بر اساس بیست قله برتر در هر پنجره تشکیل شده است. برخی از پژوهش‌ها علاوه بر ویژگی نواک، از دیگر ویژگی‌ها در شناسایی خودکار دستگاه استفاده کرده‌اند؛ مانند پژوهش عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم (2013) که علاوه بر ویژگی نواک، از سه ویژگیِ ضرایب کپسترال مبتنی بر معیار مِل[3]، مؤلفه‌های غیرهارمونیک طیفی[4] و مرکز ثقل طیفی[5] نیز استفاده کرده است؛ یا حیدریان (2016) سه ویژگی هیستوگرام نواک، کروما و میانگین طیفی را مورد بررسی قرار داده است. گواهیان جهرمی (1389) از ویژگی پروفایل پیچ استفاده کرده است. همچنین، پیوندی (1394) بر اساس پژوهش‌های انجام شده در خصوص شناسایی خودکار سَبک موسیقی غربی، از چهار ویژگی ضرایب کپسترال مَل، نرخ عبور از صفر، رول طیفی و شار طیفی برای شناسایی دستگاه‌های موسیقی ایرانی استفاده کرده است که البته نتایج مطلوبی نیز به دست نیاورده است.

همچنین، بیگ‌زاده و بلالی کوچ‌اصفهانی (2016) در پژوهش خود نشان دادند که بخشی از اطلاعات مهمِ قابل استخراج از یک قطعه (سیگنال) ورودی به‌منظور شناسایی دستگاه موسیقی ایرانی، در طیف فرکانسی آن نهفته است. بااین‌وجود، ویژگی‌ها و عوامل دیگری غیر از محتوای فرکانسیِ قطعه موسیقی نیز وجود دارند که بی‌توجهی یا استخراج نکردن آن‌ها منجر به افزایش خطا در تشخیص و دسته‌بندی دستگاه خواهد شد (بیگ‌زاده و بلالی کوچ‌اصفهانی، 2016، ص 108). به دیگر سخن، علی‌رغم اهمیت زیاد ویژگی فرکانس و نواک در شناسایی خودکار موسیقی ایرانی، کل اطلاعات مورد نیاز را نمی‌توان در این ویژگی خلاصه کرد. از طرف دیگر لازم است ویژگی توالی و ترتیب زمانی اجرای نغمه‌ها، در کنار طیف فرکانسی به‌منظور شناسایی دستگاه و گوشه در نظر گرفته شود (بیگ‌زاده و بلالی کوچ اصفهانی، 2016، ص 116).

پس از شناسایی نغمه در این پژوهش‌ها، به‌منظور تفکیکِ دستگاه‌ها از یکدیگر، از روش‌های مختلف تصمیم‌گیر و طبقه‌بندها، استفاده کرده‌اند که انواع مختلفِ شبکه‌هایِ عصبی مصنوعی، بیشتر از دیگر روش‌ها مورد توجه واقع شده است (هفت اثر از یازده

---

[1]. این اثر در سال 1393 با تحلیل مصطفی کمال‌پورتراب، با عنوان *نگاهی نو به تئوری موسیقی ایرانی گُلبُل علینقی وزیری* منتشر شد.

[2]. این کتاب بارها توسط ناشران مختلف به چاپ رسیده است که آخرین چاپ آن در سال 1396 توسط انتشارات کتاب نارون بوده است.

[3]. MFCC (Mel-frequency Cepstrum Coefficient)

[4]. Inharmonicity

[5]. SC (Spectral Centroid)

اثر). انواع دیگر روش‌های استفاده شده عبارت‌اند از: مدل مخلوطی گوسیان، ماشین‌های بردار پُشتیبان، فواصل مختلف اندازه‌گیری (فاصله اقلیدسی، مینکوفسکی، حداقل فاصله و فاصله منهتن)، نزدیک‌ترین مجاور k، مدل مخفی مارکُف و منطق فازی. ازاین‌رو، مُدل‌سازی به کمک شبکه‌های عصبی، به‌عنوان طبقه‌بند و شیوه آموزش سیستم، چه در شناسایی خودکار دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی و چه در موسیقی غربی، نسبت به دیگر روش‌ها، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

- برخی نقاط مثبت و کاستی‌ها

در این قسمت به برخی برجسته و نیز کاستی‌های مشاهده‌شده در پژوهش‌ها اشاره می‌شود:

از نقاط برجسته و مثبت پژوهش دارابی (1382) می‌توان به پیشگام بودن آن در ارائه الگوریتم و روش‌شناسی نسبتاً دقیق و صحیح برای شناسایی دستگاه‌های موسیقی ایرانی، اشاره کرد. به‌طوری‌که برخی دیگر از پژوهش‌های مرتبط بعدی، از الگوریتم و روش نسبتاً مشابهی استفاده کرده‌اند. در مقاله دیگری که سه سال پس از انجام این پایان‌نامه، توسط پژوهشگر و همکارانش منتشر شده است (دارابی، عظیمی و نجومی، 2006) ایده‌های جدیدتری مطرح شده است و علاوه بر شناسایی نواک، ویژگی‌های صوتی بیشتری، مانند لزوم سیر ملودیک گوشه‌ها و محاسبه برخی ویژگی‌های آماری جهت تعیین فراوانی هر یک از نغمه‌ها در قطعه موسیقی و نیز نغمه‌های شاهد یا پُرتکرار در تشکیل بردار ویژگی استفاده شده است.

اما از طرف دیگر، نوع پایگاه داده در این پژوهش مشخص نیست؛ اینکه الگوریتم پیشنهادی بر روی چه نوع و چه تعداد از داده‌ها و قطعات بررسی شده است. همچنین، نوع ساز، طول پنجره و دقت شناسایی دستگاه‌ها در متن پایان‌نامه نیامده است که به نظر می‌رسد از ویژگی منفی این پژوهش باشد. پس از برقراری ارتباط با پژوهشگر، مدعی بودند که تعدادی قطعه موسیقی در دستگاه چهارگاه، اصفهان و چند دستگاه دیگر، به‌صورت زنده در جلسه دفاع آزمون شده است، اما به نتایج آن اشاره‌ای نکردند.

گواهیان جهرمی (1390) با مبنا قرار دادن روش پیشنهادی در پژوهشِ *Zhu & Kankanhalli (2006)*، سعی در بسط، بهینه‌سازی، انطباق پارامترهای موسیقی ایرانی و همچنین، مقایسه نتایج پژوهش خود با این پژوهش کرده است (ص 96). چنین رویکرد مقایسه‌ای در کمتر پژوهش مشابه دیگر به چشم می‌خورد. باوجود اینکه پژوهش*Zhu & Kankanhalli* برای موسیقی کلاسیک غربی انجام شده و شاید نتوان برخی نتایج آن را به موسیقی سنتی ایرانی تعمیم داد، انجام پژوهش‌های تطبیقی، ضمن تقویت و استحکام نظریه‌ها و روش‌های پیشنهادی، مانع از دوباره‌کاری شده و می‌تواند مسیر تکامل پژوهش‌ها را فراهم کند. همچنین، این پژوهش یکی از معدود پژوهش‌هایی است که در خصوص کاهش هزینه محاسباتی پردازش قطعات موسیقی ایرانی بحث کرده و کوشش کرده است. در بخش استخراج ویژگی این پژوهش، اعمال کاهش بُعد زمان در الگوریتم به پایگاه داده سبب شده تا هزینه محاسباتی کاهش و سرعت الگوریتم افزایش یابد؛ به‌نحوی‌که سرعت انجام محاسبات تا ده برابر افزایش پیدا کرده است (ص 92).

اما برخی ایرادها نیز بر پژوهش گواهیان جهرمی وارد است: نگاهی به منابع و مآخذ و تاریخ انتشار مقالات مورد استفاده در این پژوهش، نشان از قدیمی بودن برخی منابع دارد؛ خصوصاً پژوهش‌هایی که الگوریتم تشخیص نواک را ارائه داده‌اند. درحالی‌که می‌توانست از منابع جدیدتری که در این حوزه منتشر شده‌اند بهره گیرد. این مسئله وقتی اهمیت خود را نشان می‌دهد که بخواهیم ویژگی پیچ را با ویژگی پروفایل پیچ مقایسه کنیم. امری که این پژوهش انجام داده و سعی در متقاعد کردن خواننده در بهینه بودن الگوریتم پروفایل پیچ نسبت به الگوریتم‌های استخراج فرکانس اصلی نغمه‌ها (ویژگی پیچ) دارد. ازاین‌رو، اینگونه بیان می‌دارد که: «در کاربردهایی نظیر تشخیص مُد و مقام (در موسیقی ایرانی و ترکی) یا تشخیص گام، استفاده از پروفایل پیچ به‌جای پیچ درعین‌حال که نتیجه مطلوبی می‌دهد، می‌تواند تا حدود زیادی از پیچیدگی‌های کار بکاهد» (گواهیان جهرمی، 1389، ص 52) که احتمالاً منظور وی کاهش هزینه‌های محاسباتی بوده است. همچنین، در این اثر، عبارت *tuning pitch* به «پیچ میزان‌سازی» ترجمه شده است که ترجمه درست آن «تنظیم پیچ» است و منظور تنظیم بین‌های فرکانسی در موقعیت‌های مشخص‌شده در فواصل تعدیل شده است؛ یا منظور از *mistuning* در این پژوهش[1] منطبق نبودن با کوک دیاپازن است، درحالی‌که به‌اشتباه «از کوک دررفتگی» و گاه «به‌هم ریختگی کوک» ترجمه شده است (ص 81).

ایرادها و نواقص چندی در پژوهش بیات (1392) به چشم می‌خورد. روش‌شناسی، شیوه و روند اجرای این پژوهش پراکنده و مبهم بیان شده است. برای مثال، وی بیان می‌کند که به‌منظور افزایش تعداد نمونه‌های پایگاه داده، برخی از قطعاتِ آلبوم‌ها که از نظر محتوای فرکانسی مشابه هم بودند، برش داده شده‌اند (ص 85)؛ اما اشاره نمی‌کند که بُرش قطعات به چه طریق و به چه تعداد بوده است؛ اینکه اصولاً معیار چنین انتخابی برای بُرش قطعات چه بوده و مشابهت در محتوای فرکانسی به چه معنایی است.

[1]. برگرفته از پژوهش Zhu & Kankanhalli (2006)

همچنین، پژوهشگر اشاره می‌کند که برای تکمیل داده‌های تِست (در شبکه عصبی)، علاوه بر قطعات ضبط‌شده در آلبوم ردیف صبا، برخی گوشه‌ها با سنتور نُه خرک نواخته و سپس ضبط شده‌اند[1] (ص 73) که باز هم نوازنده این قطعات، شرایط ضبط، تعداد قطعات نواخته شده و بازه زمانی آن‌ها مشخص نشده است. از طرف دیگر، دلیل انتخاب ده قطعه از مجموعِ هشتاد نمونه برای آموزش شبکه، منطقی به نظر نمی‌رسد؛ چرا که معمولاً در شبکه‌های عصبی، 70 تا 80 درصد داده‌ها برای آموزش و 20 تا 30 درصد از آن‌ها، برای تست انتخاب می‌شوند. همچنین، جزئیات استفاده از طبقه‌بندِ شبکه عصبی (نظارتی یا غیرنظارتی، پرسپترون یا پیش‌خورد) و نیز تعداد لایه پنهان در طراحی شبکه مشخص نیست. این پژوهش علاوه بر شیوه و سبک نگارش، از انسجام محتوایی نیز از منطق قابل قبولی تبعیت نمی‌کند و خواننده را دچار سردرگمی می‌کند؛ به‌طوری‌که سیر و روند اجرای پژوهش پراکنده بوده و به‌صورت گام‌به‌گام بیان نشده است. همچنین، در بسیاری موارد، مبانی نظری و روش‌شناسی پژوهش از یکدیگر قابل تفکیک نیست. در این پژوهش، مفاهیم نظری و پایه‌ای موسیقی، گاه به‌درستی تعریف و ارائه نشده‌اند. چنین اشتباهاتی که معمولاً از نداشتن شناخت صحیح و درک ناقص پژوهشگر از مفاهیم موسیقایی سرچشمه می‌گیرد، می‌تواند خواننده را سردرگم و مهم‌تر از همه اینکه نتایج پژوهش را منحرف کند. برای نمونه، فواصل گام و نیز دو نوع نیم‌پرده کروماتیک و دیاتونیک به‌غلط و بجای یکدیگر تعریف شده‌اند (بیات، 1391، صص 6 و 16). در این پژوهش، ادعا شده روش‌هایی که برای تشخیص نغمه در ساز سنتور ارائه شده، قابل تعمیم به سایر سازها هم می‌باشد (ص 52)؛ این گفته زمانی درست است که تفاوت سازها را تنها در تعداد اکتاو و وسعت صوتی آن‌ها بدانیم؛ این در حالی است سازها از لحاظ دیگر عوامل، مانند طنین، شکل هارمونیک نغمه‌ها و مؤلفه‌های غیرهارمونیک، با یکدیگر فرق دارند. همچنین، در این پژوهش، به‌اشتباه ذکر شده که بازه فرکانسی و تعداد اکتاوها[2] در ساز تار بیشتر از ساز سنتور است و ازاین‌رو، با ساز تار می‌توان چند دستگاه را با کوک ثابت اجرا نمود[3]؛ این در حالی است که بازه فرکانسی و تعداد اکتاو در تار کمتر از سنتور است.

در جای دیگر بیات (1391، ص 26) ادعا می‌کند که با آشکار کردن فرکانس پایه (پیچ هر نغمه) با استفاده از شابلون فرکانسی و مقایسه آن با فرکانس استاندارد نغمه‌ها (دیاپازن)، می‌توان علاوه بر شناسایی نغمه، سبک نوازندگان مختلف و نیز مقدار ناکوک بودن ساز را نیز مشخص کرد و حتی به مقایسه ردیف‌های مختلف پرداخت. این در حالی است که هیچ‌یک از این ادعاها منطقی به نظر نمی‌رسد و مبنای علمی ندارد. از طرف دیگر، مدت‌هاست با کمک نرم‌افزارهای مختلف تنظیم کوک[4] که عموماً به‌صورت بلادرنگ[5] کار می‌کنند، چنین هدفی به لحاظ کاربردی تحقق یافته است.

در پژوهش عبدالله‌زادگان (1393) ادعا شده که نغمه شاهد استخراج شده است (ص 19)، اما نحوه و روش آن مطرح نشده است. همچنین، در بخشی از اثر آمده که: «در موسیقی دستگاهی ایرانی، به دلیل ساختار متفاوت، یعنی داشتن مایه‌های مختلف و سرعت‌های متفاوت در هر دستگاه، نمی‌توان از ویژگی‌های صوتی بکار رفته در پژوهش‌های شناسایی سبک موسیقی غربی استفاده کرد» (عبدالله‌زادگان، 1393، ص 29). اگرچه ممکن است برخی از این ویژگی‌های صوتی در موسیقی ایرانی کاربرد نداشته باشند، اما نه به دلایل فوق که ذکر شد؛ چراکه قطعات ساخته و اجراشده در یک سَبک موسیقی غربی، مثلاً پاپ، نیز عناصری مانند مایه و سرعت اجرا می‌توانند از تنوع زیادی برخوردار باشند. لذا، بیان این مسئله را می‌توان ناشی از نداشتن شناخت کافی از عناصر سازنده و مبانی نظری موسیقی دانست. همچنین، در بخش‌هایی از متن این اثر، اشتباه‌های نگارشی، ساختاری و محتوایی نیز قابل توجه است.

در پژوهش پیوندی (1394) و همچنین پژوهش حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری (2012) برخلاف دیگر پژوهش‌ها، به نحوه شناسایی نواک و نغمه‌های قطعات موسیقی هیچ‌گونه اشاره‌ای نشده است؛ این در حالی است که این مرحله، پیش‌نیاز و یکی از مراحل مهم شناسایی دستگاه و گام است. ولی از طرف دیگر، مبانی فنی و ریاضی مطرح‌شده در این پژوهش، ازجمله ویژگی‌ها و بُردار صوتی و انواع دسته‌بندها برای شناسایی خودکار موسیقی، نسبت به دیگر پژوهش‌های مشابه، جامع‌تر است. از دیگر کاستی‌های این پژوهش این است که ویژگی‌های موسیقی ایرانی (مانند نقش درجات و جایگاه نغمه شاهد، ایست و غیره) نه مطرح و نه در فرایند شناسایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، با وجود نسبتاً جدید بودن پژوهش (1394)، انتظار می‌رفت بخش

---

[1] . با استفاده از کامپیوتری با کارت صوتی 32 بیت و فرکانس نمونه‌برداری 44/1 کیلوهرتز

[2] . احتمالاً منظور نویسنده، تعداد پرده‌های ساز بوده و نَه تعداد اُکتاو

[3] . توانایی اجرای چند دستگاه در سازی مثل تار (یا سه‌تار)، با کوک کردن تنها سه جفت سیم، نه به دلیل وسعت صوتی آن، بلکه به دلیل پرده‌بندی کلیه نغمه‌های بالقوه و امکان اجرای تمامی گام‌های کروماتیک (و در نتیجه امکان اجرای کلیه دستگاه‌ها و دیگر گام‌های دیاتونیک و اِشِل‌های صوتی موجود) در این نوع ساز است. درحالیکه چنین امکانی برای ساز سنتور معمولی نُه خرک تعبیه نشده است. البته طی بیست سال اخیر، نوع خاصی از سنتور به نام «سنتور کروماتیک» توسط برخی از سازندگان این ساز ارائه شده است و این امکان را فراهم کرده تا مانند بسیاری از دیگر سازها، قابلیت اجرای بیشتر دستگاه‌ها و گام‌ها با یک کوک خاص را داشته باشد (پژوهشگر).

[4] . Music Tuner Applications

[5] . Realtime

مبانی نظری موسیقی این پژوهش از غنای بیشتری برخوردار بوده و از پیشینه پژوهش‌های مرتبط مناسب‌تری استفاده می‌شد. نگاهی به فهرست منابع این اثر، مؤید این مطلب است که از منابع مهم موسیقی ایرانی استفاده نشده است. به لحاظ ساختاری نیز، می‌توان به برخی ایرادات، مانند ترجمه غیرروان، نامفهوم (مثلاً باتون به‌جای مضراب؛ تُن به‌جای نغمه صفحه 6) و گاه گمراه‌کننده[1] برخی واژگان تخصص موسیقی و نیز برخی غلط‌های نگارشی و املایی در متن اشاره کرد.

در پژوهش دارابی، عظیمی و نجومی (2006)، همانند اثر قبلی پژوهشگر (دارابی، 1382)، تعداد داده‌ها و نوع پایگاه داده در این پژوهش مشخص نشده است. همچنین، در فواصل نغمه‌های برخی دستگاه‌ها، برخی اشتباهات و تضادها به چشم می‌خورد. برای مثال، در صفحه 1، فواصل نرمال شده گام بالقوه دستگاه شور در 53 فاصله مساوی (از چپ به راست: 9 9 4 9 9 7 6) و درجایی دیگر (ص 3) در 60 قسمت مساوی (از چپ به راست: 10 10 5 10 10 9 6) تقسیم شده است. یا در تقسیم‌بندی دوازده‌گانه دستگاه‌ها اشکالاتی دیده می‌شود. برای مثال، دستگاه ماهور در این تقسیم‌بندی نیست! همچنین، برخی گوشه‌های خاص از یک دستگاه (مثل مخالف سه‌گاه)، جداگانه و مستقل از خود دستگاه در نظر گرفته شده‌اند؛ یا مایه (تُنالیته) و ایست دوم دستگاه همایون، به‌طور جداگانه آمده است. لازم به ذکر است در اثر قبلی این پژوهشگر، تقسیم‌بندی مشابه‌ای از دستگاه‌ها انجام شده و در آن آرایه‌های بکار رفته برای هر دستگاه بر اساس فاصله فرکانسی نغمه‌ها از یکدیگر در سیستم‌ها مختلف تعدیل (تقسیم یک اُکتاو به 12، 17، 24 و 53 قسمت مساوی) بررسی شده است (دارابی، 1382، ص 41).

عبدلی (2011، ص 275) که در پژوهش خود از روش منطق فازی استفاده کرده است، در متن اثر به سه مقاله اشاره می‌کند که آن‌ها نیز از همین روش استفاده کرده‌اند. این پژوهش‌ها که بین سال‌های 2008 تا 2010 انجام شده، روش فازی به‌منظور شناسایی حس‌وحال موسیقی و مُدل‌سازی کوک نغمه‌های موسیقی بکار رفته است و در هیچ‌یک از آن‌ها، برای شناسایی و دسته‌بندی گام، مایه، گوشه و یا دستگاه موسیقی نبوده است. ازاین‌رو، با وجود آنکه پژوهش عبدلی را می‌توان اولین پژوهشی دانست که از روش منطق فازی برای شناسایی و دسته‌بندی موسیقی سنتی ایرانی استفاده کرده است، اما آنکه دلیل و مزایای انتخاب چنین روشی به‌وضوح مشخص نیست.

در پژوهش حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری (2012) ادعا شده که شبکه قادر است کل 120 حالت برای دستگاه‌ها در پنج گروه را با دقت 100 درصد، به‌درستی شناسایی و طبقه‌بندی کند؛ این در حالی است که به تعداد قطعات موسیقی و نوع داده‌های آموزشی و خروجی، به‌منظور آموزش و بررسی میزان کارآمدی شبکه، اشاره‌ای نشده است. به نظر می‌رسد چنین نتیجه‌گیری‌ای صرفاً بر اساس شبیه‌سازی[2] شبکه صورت گرفته (همان، ص 159) و ازاین‌رو، می‌توان گفت این مقاله صرفاً جنبه نظری داشته و طرح چنین ادعایی، بدون بررسی و تجزیه‌وتحلیل بر روی داده‌های آموزشی واقعی، نادرست است. حتی اگر هدف این پژوهش صرفاً مطرح کردن مباحث نظری طراحی شبکه عصبی برای شناسایی دستگاه‌های موسیقی ایرانی بوده، لازم بود به این مسئله اشاره می‌شد. به‌عبارت‌دیگر، ادعای دقت شناساییِ 100 درصد تا زمانی که بر روی پایگاه داده‌ای متشکل از مجموعه قطعاتِ موسیقی در 120 دستگاه موسیقی ایرانی ادعا شده تِست و بررسی نشده باشد، کاملاً نادرست است.

در این پژوهش، مبنای انتخاب شبکه عصبی برای طبقه‌بندی و شناسایی دستگاه‌ها، مقاله‌ای با عنوان «شبکه‌های عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی آکوردهای موسیقی» بوده که توسط دوسُن و یارِمچوک[3] در سال 2008 انجام شده و در آن از تابع فعال‌سازی گوسیان و سه‌لایه مخفی استفاده شده است. ازآنجاکه شناسایی آکورد، در موسیقی هوموفونیک مطرح بوده و معمولاً در موسیقی سنتی ایرانی جایگاهی ندارد، قطعاً روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش با روش‌های شناسایی گام و دستگاه متفاوت خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر، اعمال جزئیات روش‌های استفاده شده در شناسایی آکورد، برای شناسایی گام و دستگاه نمی‌تواند توجیه منطقی داشته باشد. بااین‌وجود، در این مقاله آمده: «ازآنجاکه تابع فعال‌سازیِ گوسیان، فضای ورودی 24 بُعدی را بهتر از روش تابع فعال‌سازی سیگموئید[4] تقسیم‌بندی[5] می‌کند، ازاین‌رو، در مسئله طبقه‌بندی گام گام نیز مناسب تشخیص داده شد» (حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری، 2012، ص 158). حتی به نوع شبکه استفاده شده (پرسپترون چندلایه، توابع پایه شعاعی و غیره) نیز اشاره نشده است. این پژوهش را نمی‌توان خودکار دانست، چراکه جهت استخراج فواصل موجود در هر قطعه، نیازمند یک ناظر است. همچنین، در این پژوهش به شرایط ضبط، اجرا و یا استخراج قطعات و داده‌های موسیقی، سازهای بررسی‌شده، نوع کوک و فرکانس نمونه‌برداری هیچ‌گونه اشاره‌ای نشده است.

---

[1] . مثلاً واژه Compositional که به معنای تصنیفی یا آهنگسازی است، به اشتباه «ترکیبی» (ص 12) یا واژه Pitch که به معنای پیچ فرکانسی یا نواک است، به اشتباه «گام» ترجمه شده است (پیوندی، 1394، ص 23).

[2] . Simulation

[3] . Dawson & Yaremchuk (2008)

[4] . Sigmoid-shaped activation function

[5] . Carve up

پژوهش عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم (2013)، تنها پژوهشی است که بر روی یک ردیف متداول[1] و معتبر موسیقی ایرانی، یعنی ردیف میرزاعبدالله متمرکز شده است. به باور نگارنده این سطور نیز، این ردیف می‌تواند منبع خوبی برای سرآغاز انجام پژوهش‌های مرتبط با موسیقی سنتی ایرانی باشد. از کاستی‌های پژوهش، این است که مشخص نشده که کدام‌یک از چهار ویژگی صوتی، از اهمیت بیشتری در شناسایی خودکار گوشه‌ها و دستگاه‌ها برخوردار است. برخی اشکالات ساختاری نیز در این پژوهش دیده می‌شود. برای مثال، در قسمت مرور پیشینه (صص 58 و 59) برخی ارجاع‌ها به‌اشتباه داده شده‌اند. مثلاً مقابل نام *Saunders* و سپس *Saad* به ترتیب شماره‌های ارجاع 1 و 2 آمده است. درحالی‌که با مراجعه به بخش منابع این پژوهش، مقال این ارجاع‌ها منابع دیگری ذکر شده است. یا به برخی از پژوهش‌ها در داخل متن اشاره شده است که با مشاهده فهرست منابع، این آثار به چشم نمی‌خورند (به‌عنوان مثال پژوهش *Scheirer and Slaney*). همچنین، در این پژوهش، گفته شده که پایگاه داده‌ای متشکل از 250 گوشه (برگرفته از پنج لوح فشرده ضبط‌شده) ایجاد شده است که توسط چهار نوازنده مشهور و بنام تار و سه‌تار اجرا شده‌اند؛ اما به‌عنوان آلبوم‌ها و نام نوازندگان اشاره‌ای نشده است. این 250 گوشه از 13 دستگاه و آواز دستگاه موسیقی ایرانی انتخاب شده است (ماهور 44، شور 34، چهارگاه 31، همایون 28، راست‌پنجگاه 25، نوا 21، سه‌گاه 20، بیات‌تُرک 15، ابوعطا 10، بیات‌کُرد 8، بیات‌اصفهان 7، دشتی 5 و افشاری 4 قطعه). در این پژوهش، روش نمونه‌گیری و همچنین، سهم هر یک دستگاه‌ها برای دو ساز تار و سه‌تار مشخص نشده است.

در پژوهش بیگ‌زاده و بلالی کوچ اصفهانی (2016)، پژوهشگر اشاره می‌کند که قطعات کوتاه و ساده در دستگاه‌های مختلف توسط اساتید آواز، نی و ویلن به‌صورت تک‌نوازی اجرا و در فرمت wav (با فرکانس نمونه‌برداری 44/1 کیلوهرتز و نرخ 8 بیت در هر ثانیه) ذخیره شده‌اند. تعداد کل داده‌ها 348 قطعه است که 75 درصد از آن، یعنی 264 قطعه برای داده‌های آموزش و 25 درصد، یعنی 84 قطعه به‌عنوان داده‌های آزمون[2] به‌صورت تصادفی انتخاب و استفاده شده‌اند. بااین‌وجود، دقیقاً مشخص نشده که آیا خود پژوهشگر قطعات و گوشه‌ها را ضبط کرده یا از آلبوم‌های مشخصی انتخاب کرده است؛ چراکه پس از ذکر شرایط ضبط قطعات که در بالا اشاره شد، در جایی دیگر اشاره می‌کند که «قطعات آوازی از خوانندگان معروف قدیمی انتخاب شده و درنتیجه برخی از آن‌ها دارای نویز هستند» (ص 112). در کل، به نظر می‌رسد قطعات نی و ویولن ضبط و قطعات آوازی از آلبوم‌های موجود در بازار انتخاب شده‌اند. همچنین، شماره برخی ارجاع‌ها به‌غلط داده شده است. برای مثال در صفحه 110، ارجاع شماره 18 به تعریف دستگاه موسیقی ایرانی پرداخته است. درحالی‌که این منبع (زانتاکیس و کوک، 2002)[3] به دسته‌بندی سَبک موسیقی کلاسیک غربی پرداخته و با مراجعه به آن، هیچ‌گونه اشاره‌ای به موسیقی دستگاهی و ردیفی ایرانی نشده است. باوجودآنکه در متن اشاره‌ای نشده است، روش و الگوریتم بکار رفته در این پژوهش، مشابه پژوهش محمودان (1390) است و به نظر می‌رسد از آن الگو گرفته است، چرا که بخش نتیجه‌گیری، تنها به مقایسه پژوهش خود با پژوهش محمودان پرداخته است و روش بکار گرفته شده نیز یکسان است. ازاین‌رو، بهتر بود پژوهشگر به این مسئله اشاره می‌کرد.

- پیشنهادهای ارائه‌شده

باوجود پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناسایی خودکار دستگاه در موسیقی ایرانی، امکانِ بررسی‌های گسترده‌تری در این حوزه وجود دارد. برای مثال، برخی سازها یا اصلاً مورد بررسی قرار نگرفته‌اند (مانند بَربَط یا عود) و یا توجه به آن‌ها کمرنگ بوده است (مانند ساز تار، آواز، کمانچه و نی). همچنین، شناسایی خودکارِ مقام‌های موسیقی قومی و محلی ایران موضوع بِکری است که دقت و توجه ویژه‌ای را می‌طلبد و پژوهشگر این نوع موسیقی لازم است علاوه بر آشنایی با لطایف و ریزه‌کاری‌های مقام‌های محلی (مانند آذری، لُری، کردی، خراسانی و غیره) با ساختار فیزیکی و خصوصیات صدادهی هر یک از سازها نیز آشنایی کافی داشته باشد.

در بین پژوهش‌های انجام‌شده، هر یک پیشنهادهایی برای انجام مطالعات و پژوهش‌های بعدی ارائه داده‌اند که در جدول 8 به برخی از مهم‌ترین آن‌ها که بیشتر جنبه کاربردی دارند، اشاره شده است. برای مثال، عبدالله زادگان پیشنهاد بررسی با سازهای کِشِشی (کمانچه و ویولن) را می‌دهد که احتمالاً روند تشخیص فرکانس متفاوتی با سازهای زخمه‌ای خواهد داشت (ردیف 4) یا در ردیف 6 جدول 8، حیدریان پیشنهاد بازشناسی نغمه و دستگاه در گروه‌نوازی را می‌دهد. گروه‌نوازی می‌تواند شامد مواردی شود که چند ساز با یکدیگر قطعه مشابهی را می‌نوازند، یا سازهای کوبه‌ای، مانند تنبک و دف، سازی را همراهی می‌کنند و یا هنگامی که ساز و آواز در کنار یکدیگر اجرا می‌کنند.

همان‌طور که اشاره شد، به دلیل شباهت فواصل دستگاه‌ها، امکان تفکیک و شناسایی حتی پنج دستگاه اصلی از یکدیگر به‌طور کامل وجود ندارد. ازاین‌رو، پژوهش‌های چندی، بجای تفکیک دستگاه‌ها

[1] . Canonical Repertoire

[2] . اگرچه در خود پژوهش این نسبت 70 به 30 عنوان شده است.

[3] . Tzanetakis & Cook (2002)

جدول 8. پیشنهادهای ارائه‌شده در پژوهش‌های مرتبط با شناسایی خودکار دستگاه در موسیقی ایرانی

ردیف	پیشنهادهای ارائه‌شده	منبع
1	شناسایی گوشه‌های ردیف، بجای شناسایی و تفکیک دستگاه از یکدیگر	(دارابی، 1382، ص 65؛ بیات، 1392؛ عبدالله زادگان، 1393، ص 59؛ عبدلی، 2011، ص 280 و حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری، 2012، ص 160)
2	بررسی نقش درجات (به‌خصوص شاهد و ایست)، به‌عنوان ویژگی صوتی مهم، در شناسایی خودکار دستگاه یا گوشه	(محمودان، 1390؛ عبدالله زادگان، 1393، ص 59 و حیدریان، 2016، ص 143)
3	بهینه‌سازی الگوریتم‌ها و پارامترها	(حیدریان، 1379؛ عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم، 2013 و بیگ‌زاده و بلالی کوچاصفهانی، 2016)
4	انجامِ پژوهش‌های مشابه، برای دیگر سازهای ایرانی	(محمودان، 1390؛ بیات، 1392، ص 88 و عبدالله زادگان، 1393، ص 59)
5	بررسی و شناسایی خودکار انواع موسیقی قومی و محلی ایران	(بیات، 1392، ص 88)
6	بازشناسی نغمه و دستگاه در گروه‌نوازی[1]	(حیدریان، 1379، ص 92 و عبدالله زادگان، 1393، ص 59)

از یکدیگر، شناسایی و طبقه‌بندی گوشه‌های دستگاه‌ها یا گوشه‌های یک ردیف از یکدیگر را پیشنهاد داده‌اند؛ به نظر می‌رسد **استخراج الگویِ سیر ملودیِ گوشه‌ها**، در کنار دیگر ویژگی‌های گوشه‌ها می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد. اگرچه برخی از پژوهش‌ها (مانند دارابی، عظیمی و نجومی، 2006 و بیات، 1392) بر اهمیت شناسایی ملودی مُدل اصلی گوشه‌ها به‌منظور شناسایی خودکار موسیقی ایرانی و نه صرفاً شناسایی نغمه‌های یک دستگاه و گام در فاصله اُکتاو، اشاره‌هایی کرده‌اند، اما خود به‌طور جدی به شناسایی الگوی ملودیک گوشه‌ها نپرداخته و در عمل موفق نبوده‌اند[1].

پیشنهادهایی که به‌منظور بهینه‌سازی الگوریتم‌ها ارائه شده، در راستای بهبود، افزایش کارآمدی پارامترها یا کاهش هزینه محاسباتی انجام شده است. برای مثال، آشکارسازی لحظه شروع نغمه[2] (حیدریان، 1379، ص 92)، انتخاب تابع هسته مناسب در طبقه‌بندِ بردارهای پشتیبان ماشینی (عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم، 2013، ص 65) و یا استفاده از طول موج[3] بجای تبدیل فوریه فوریه سریع، به‌منظور بررسیِ دو عامل زمان و فرکانس در کنار یکدیگر (بیگ‌زاده و بلالی کوچاصفهانی، 2016، ص 117)

برخی پیشنهادهای دیگر که برخاسته از پژوهش و یا کاربردی نیست؛ مانند شناسایی خودکار ریتم (حیدریان، 1370؛ بیات، 1392) و بررسی نوع انتخاب کوک توسط نوازندگان و خوانندگان (ردیف‌خوان یا ردیف‌نواز) سرشناس موسیقی سنتی ایرانی، به‌منظور رسیدن به الگوهای مختلف فواصل صوتی دستگاه‌های مختلف (عبدلی، 2011، ص 280).

بحث و نتیجه‌گیری

عمده‌ترین محدودیت‌هایی که بر سر راه پژوهش‌های مرتبط با دسته‌بندی و تشخیص خودکار دستگاه‌های موسیقی ایرانی وجود داشته را می‌توان در سه مقوله کلی جای داد: **الف. انجام پژوهش‌ها به‌صورت موازی و مجزّا، ب. نبودِ پایگاه داده منسجم و ج. نداشتنِ دانش کافی پژوهشگران از مبانی نظری موسیقی سنتی ایرانی.** این عوامل در کنار یکدیگر، منجر شده تا نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، عمدتاً از کارآمدی و مطلوبیت لازم برخوردار نبوده و به مرحله پیاده‌سازی و تولید نرم‌افزار کاربردی نرسد.

نبود یک پایگاه داده کامل و جامع، سبب شده تا مقایسه کارایی و علمکردِ الگوریتم‌های پیشنهادی و تعمیم نتایج این نوع پژوهش‌ها امکان‌پذیر نباشد. در چنین شرایطی، گاه پژوهشگر در تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با دشواری مواجه شده و از قابلیت اعتماد به نتایج پژوهش‌ها نیز کاسته خواهد شد. ازاین‌رو، ضروری است پایگاه داده‌ای ایجاد و ارائه شود که همه گوشه‌ها، دستگاه‌ها، ردیف‌ها و نیز قطعات مهم ساخته‌شده در موسیقی سنتی ایرانی را دربر گرفته و شامل نمونه‌ها و اجراهای مختلفی از کلیه سازهای ملی باشد.

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناسایی خودکار دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی نشان داد که پژوهشگران از دانش موضوعی کافی و اشراف لازم در خصوص دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی نداشته‌اند یا حداقل به‌طور جامع به کلیه ابعاد آن نگاه نکرده‌اند. اشراف کامل به ردیف موسیقی ایرانی و جزئیات کلیه گوشه‌های آن، نیازمند صرف زمان قابل توجه به‌منظور

[1] . دارابی، عظیمی و نجومی (2006، ص 3) دلیل اصلیِ پیچیدگیِ شناسایی و تفکیک گوشه‌ها از یکدیگر را شباهت ملودی گوشه‌ها به یکدیگر و همچنین نبود تعریفِ دقیق و ریاضی از این ملودی‌ها عنوان می‌کند است؛ به عبارت دیگر، نداشتنِ معیاری برای شناسایی و اندازه‌گیریِ وجه افتراقِ گوشه‌ها از یکدیگر را می‌توان مهمترین عامل در موفق نشدن اینگونه پژوهش‌ها در شناسایی خودکار و تفکیک گوشه‌ها از یکدیگر دانست. به باور پژوهشگر، جُمله معرّف هر گوشه، می‌تواند چنین معیاری را فراهم سازد.

[2] . Onset

[3] . wavelet

یادگیری و مقایسه گوشه‌ها با یکدیگر است. همچنین، لازم است دانش و مبانی نظری این نوع موسیقی را آموخته و کسب کرد تا بتوان درمجموع، تجزیه‌وتحلیل صحیحی از دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی ایرانی انجام داد. به دیگر سخن، فهم کلیه جوانب و ابعاد این نوع موسیقی، جز از طریق شناخت دقیق، درک عمیق، تجزیه‌وتحلیل و مقایسه تطبیقی کلیه ردیف‌های موجود موسیقی ایرانی به دست نمی‌آید. رسیدن به چنین شناختی، مستلزم سال‌ها تجربه عملی و نظری در این حیطه است که تنها از عهده کسی برمی‌آید که علاوه بر نوازندگی و اجرای ردیف موسیقی سنتی ایرانی به‌صورت حرفه‌ای و تحلیلی، سعی در کسب دانش موضوعی این نوع از موسیقی نیز کرده باشد.

ازاین‌رو، یادگیری و تسلط بر ردیف موسیقی ایرانی، مستلزم فراگیری و درک عمیق و بنیادین هر یک از گوشه‌های موجود در دوازده دستگاه و آواز است که با ترتیب و نظم خاصی در پی یکدیگر آمده‌اند. رسیدن به چنین درکی از موسیقی ایرانی، خود زمینه‌ساز و مبنای بداهه‌نوازی و یا خلق آثار جدید در این نوع موسیقی خواهد بود.

به‌طورکلی، ضعف یا نداشتنِ شناختِ کافی از مبانی نظری و عملیِ موسیقی را می‌توان از جنبه‌های مختلف مشاهده و بررسی کرد. ازیک‌طرف، این مسئله منجر شده تا در برخی پژوهش‌ها (مانند محمودان[1]، 1390، عبدالله‌زادگان، 1393، پیوندی، 1394، حاجی‌ملاحسینی، امیرفتاحی و ذِکری، 2012، ص 157 و عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم، 2013) تفکیک و تشخیص دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی معادل تشخیص سَبک و ژانر در موسیقی غربی تلقی شود. ازاین‌رو، بدون اندازه‌گیری و سنجشِ ویژگی‌های موسیقی سنتی ایرانی، الگوریتم‌ها و مراحل بکار رفته در موسیقی غربی را در پژوهش خود، بکار گرفته‌اند. برای مثال، چهار ویژگی انتخاب‌شده در پژوهشِ پیوندی (1394) یا چهار ویژگی صوتی دیگر در پژوهش عباسی لایق، حقی‌پور و نجفی سارم (2013) برای شناسایی دستگاه‌ها در موسیقی ایرانی، هیچ دلیل و توجیه منطقی ندارد؛ چراکه این ویژگی‌ها بیشتر در شناسایی سَبک موسیقی غربی کاربرد دارند تا شناسایی دستگاه در موسیقی ایرانی. البته طی مباحثه‌ای که با پژوهشگر انجام شد، خود نیز اذعان داشتند که چنین مقایسه‌ای اصولاً اشتباه است؛ و می‌توان گفت که همه گوشه‌های ردیف موسیقی ایرانی یا قطعات خلق‌شده در کلیه دستگاه‌ها، در لِـوای یک سَبک، با عنوان «موسیقی سنتی ایرانی» قرار می‌گیرند. آنچه سَبک‌های مختلف در موسیقی غربی را از یکدیگر متمایز می‌کند، ترکیبی از عناصر سازبندی، ریتم، سرعت اجرا و حس‌و حال قطعه است؛ درحالی‌که موسیقی سنتی ایرانی، اساساً چنین عناصری در تشخیص دستگاه‌ها و گوشه‌ها از یکدیگر تأثیرگذار نیستند؛ برای مثال در گروه‌نوازیِ موسیقی سنتی ایرانی، ترکیب سازها ارتباطی به دستگاه و گوشه اجرایی نداشته و یا در هر یک از دستگاه‌ها یا آوازها، قطعات بسیار متنوع، با حس‌وحال یا سرعت‌های مختلف می‌تواند اجرا شوند. همچنین، باید توجه داشت که از ویژگی‌های بارزِ موسیقی ایرانی، اجرایِ قطعات اغلب به‌صورت تک‌نوازی یا ریتمِ آزاد است.

از طرف دیگر، شناخت ناکافی پژوهشگران از تحلیل ردیف‌های مختلف، گاه منجر به ارائه اطلاعات ناکافی یا انتخاب نادرست داده‌های ورودی شده است. برای مثال در پژوهش محمودان و بنوشی (1391)، تعداد قطعات نواخته شده در شش دستگاه مختلف، 195 عنوان شده که همگی آن‌ها درآمد دستگاه یا آواز بوده‌اند. این درحالی است که ردیف‌های منتخب و تنوع آن‌ها و نیز تعداد دفعات تکرار یک درآمدِ خاص، مشخص نشده است. این‌ها همگی در نتیجه و تحلیل داده‌ها تأثیرگذار بوده‌اند. از طرف دیگر، نداشتن شناخت دقیق از گوشه‌های ردیف به‌صورت عملی و نظری، می‌تواند منجر به نتیجه‌گیری نادرست و گاه سردرگمی خواننده شود. چنانچه در پژوهش محمودان و بنوشی، اینگونه نتیجه‌گیری شده که: طیف فرکانسی قطعاتی که در یک دستگاه قرار دارند، ازلحاظ قُـله‌های غالب تقریباً شبیه به هم هستند (1391، ص 7). ازآنجاکه فقط درآمد اول هر دستگاه نواخته شده و بقیه گوشه‌ها نواخته نشده‌اند، این شباهت به درآمد اول دستگاه قابل تعمیم است و نه دیگر گوشه‌های دستگاه. در پژوهش بیگ‌زاده و بلالی کوچاصفهانی (2016، ص 111) نیز همین مقایسه اشتباه برای سه قطعه نواخته شده با سازِ نِـی در دستگاه چهارگاه انجام شده است.

در برخی پژوهش‌های انجام شده (مانند بیات، 1391، ص 70 و گواهیان جهرمی[2]، 1389، ص 84)، بر اساس باور رایج و نه‌چندان صحیح در مبانی نظری موسیقی سنتی ایرانی، این مسئله مطرح شده که نغمه شاهد نسبت به دیگر نغمه‌های همان قطعه یا گوشه، از فراوانی بیشتری برخوردار است. بر این اساس، فراوانی آن‌ها و تعداد دفعات اجرای کل نغمه‌ها معیاری برای شناسایی دستگاه و گوشه بوده است. طبق بررسی‌های انجام شده بر روی گوشه‌های اصلیِ دستگاه شور و بر اساس نغمه‌نگاریِ ردیف میرزاعبدالله از کتاب داریوش طلایی[3]، چنین مسئله‌ای همواره صادق نبوده و در

---

[1] . بکار بردنِ عبارت "دسته‌بندی نشانه‌های موسیقایی بر پایه سَبک" (محمودان، 1390، ص 2) بجای تفکیک و شناسایی دستگاه‌ها در موسیقی سنتی ایرانی، ناشی از مقایسه نادرست مفهوم دستگاه در موسیقی ایرانی با سبک در موسیقی غربی است.

[2] . در این پژوهش، بر اساس فراوانی بین‌ها، نغمه‌ای که بیشترین فراوانی را داشته، به عنوان درجه نخست آن گام (شاهد) درنظر گرفته شده است.

[3] . در رساله دکتری با عنوان «شناسایی خودکار دستگاه شور در موسیقی سنتی ایرانی بر پایه تک‌نوازی سازهای تار، سه‌تار، سنتور و بربط» گروه آموزشی علم اطلاعات و دانش‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، پژوهشگر: امیر وفائیان.

برخی گوشه‌ها، فراوانی بیشتر یک نغمه، الزاماً به معنای نغمه شاهد نیست. به‌عبارت‌دیگر، در برخی گوشه‌ها، نغمه شاهد با تعریفِ نظری رایج آن مغایرت داشته و به‌منظور شناسایی نغمه شاهد در یک گوشه خاص، لازم است علاوه بر فراوانی نغمه‌های بکار رفته، کشش و ارزش زمانی آن‌ها را نیز بررسی کرد.

نکته بسیار مهمی که در دیگر پژوهش‌های مرتبط مورد غفلت واقع شده و درنهایت منجر به افزایش میزان خطای تشخیص خودکار و تفکیک دستگاه‌ها از یکدیگر شده است، تلاش برای شناسایی دستگاه‌ها تنها بر اساس میزان اِشِل صوتی آن‌ها بوده است. همان‌طور که در بخش فواصل موسیقایی نیز مطرح شد (جدول 5)، اِشِل صوتی و گامِ بالفعلِ بیشترِ دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی، در یکی از دانگ‌های اول یا دوم با یکدیگر اشتراک دارند. به‌عبارت‌دیگر، فواصل گام‌ها در دستگاه‌های موسیقی سنتی، بسیار به یکدیگر شبیه و نزدیک هستند و این خود مانعی جدی برای تفکیکِ دستگاه‌ها از یکدیگر است. ازاین‌رو، با اندکی تغییر در فواصل یک گام، می‌توان به دستگاه دیگری انتقال یافت. برای مثال، چنانچه درجه سوم دستگاه شور را نیم‌پرده افزایش دهیم، بدون هیچ تغییر دیگری در دیگر درجات این گام، به دستگاه جدید همایون و آواز اصفهان خواهیم رسید؛ یا با کاهش رُبع‌پرده در درجه سوم گام شور، دستگاه سه‌گاه ایجاد خواهد شد. همین مسئله، یعنی تغییرات جزئی در فواصل گام‌ها، برای رسیدن به دیگر دستگاه‌ها نیز صدق می‌کند. نتایج پژوهش عبدلی (2011، ص 279) نیز مؤید این مسئله است؛ به‌نحوی‌که بیشترین شباهت، بین دو دستگاه ماهور و چهارگاه (73 درصد شباهت) و کمترین شباهت بین چهارگاه و سه‌گاه (با 43 درصد شباهت) است. شباهت کلی فواصل دستگاه‌ها به یکدیگر نیز 85 درصد عنوان شده است که رقم قابل توجهی است. همچنین، عبدالله زادگان (1393، ص 44) در پژوهش خود، میزان شباهت بین پنج دستگاه اصلی موسیقی ایرانی را بررسی کرده است. نتایج این پژوهش نشان داد که همه دستگاه‌ها بالای 43 درصد به یکدیگر شباهت دارند[1].

دو رویکرد اساسی در شناسایی خودکار دستگاه و گوشه در موسیقی سنتی ایرانی

دو رویکرد کلی را در شیوه انجامِ اینگونه پژوهش‌ها می‌توان متصور شد. پژوهش‌هایی که صِرفاً بر اساس اِشِل صوتی و فواصل در پنج دستگاهِ اصلی، سعی در تفکیک و شناسایی خودکارِ این دستگاه‌ها از یکدیگر داشته‌اند (رویکردِ ماکرو[2])، می‌توان گفت که عمده پژوهش‌هایی که تاکنون منتشر شده‌اند، این رویکرد را انتخاب کرده‌اند. رویکرد دوم، شناسایی خودکارِ گوشه‌های مختلف در ردیف دستگاهی و قطعاتِ ساخته‌شده در موسیقی سنتی ایرانی است (رویکرد میکرو[3]). تا حدودِ زیادی می‌توان برای گوشه‌ها اصالت قائل بود و ازآنجاکه ملودی مُدلِ اصلی در هر گوشه، در جمله مُعرّف آن گوشه تجلی می‌یابد، بر اساسِ جمله مُعرّفِ هر گوشه که در یکی از سه حالتِ سیرِ ملودی، الگویی ریتمیک یا تحریر، مختص و متمایزند، می‌توان آن‌ها را از یکدیگر بازشناخت. به‌عبارت‌دیگر، یک گوشه را می‌توان به جملات (انگاره‌های) تشکیل‌دهنده آن تجزیه کرد و با شناسایی مهم‌ترین جمله آن، یعنی جمله مُعرّف، گوشه موردنظر را شناسایی کرد؛ این درحالی است که تقسیم‌بندیِ دستگاه‌ها از اصالت لازم برخوردار نبوده و در این خصوص بینِ نظریه‌پردازان و موسیقی‌دان‌ها، از نظر تعداد دستگاه و مرزِ بین آن‌ها اتفاق‌نظر وجود ندارد. از طرف دیگر، تفکیکِ کاملِ دستگاه‌ها صرفاً بر اساسِ اِشِل صوتی آن‌ها غیرممکن است، زیرا همان‌طور که گفته شد، فواصل گام‌ها در دستگاه‌های موسیقی سنتی، بسیار به یکدیگر شبیه و نزدیک هستند. این درحالی است که با دسته‌بندی و تشخیص گوشه‌ها از یکدیگر، دستگاهِ مربوط به آن را نیز می‌توان شناسایی کرد.

به‌طورکلی، بررسی سیرِ ملودیِ قطعات و گوشه‌ها (به‌خصوص جمله مُعرّف در ردیف)، به‌عنوان عاملی مهم و مغفول مانده در پژوهش‌های انجام‌شده، در کنار شناسایی نغمه، تعیینِ نسبتِ فواصل نغمه‌ها و بررسیِ نقش درجات گام هر گوشه یا دستگاه (به‌خصوص شاهد)، نهایتاً منجر به دسته‌بندی و شناساییِ دقیق‌تر خودکار دستگاه‌ها و گوشه‌های موسیقی سنتی ایرانی خواهد شد.

ازاین‌رو، انجامِ پژوهش‌هایی با رویکردِ میکرو که در آن تأکید بر شناسایی خودکارِ گوشه‌های اصلی، از طریقِ بررسی سیرِ ملودیِ جمله‌های مُعرّف هر گوشه است و همچنین، یافتنِ روش‌هایی به‌منظور بهبودِ عملکردِ سامانه‌ها در تشخیصِ نغمه، نقشِ درجات و مایه، به‌عنوان جهت‌گیریِ آینده پژوهش‌ها پیشنهاد می‌شود.

مسلّم آنکه داشتن شناخت و دانش کافی در حوزه‌های علم آکوستیک و صدادهی سازها، یادگیری ماشین، پردازش سیگنال و از همه برجسته‌تر و مهم‌تر، شناخت (نظری و عملی) دستگاه‌ها و ردیف‌های مختلف موسیقی ایرانی به‌منظور تجزیه‌وتحلیل گوشه‌ها و تشخیص و تعیین وجه تمیز آن‌ها در انجام پژوهش‌های کارآمد در زمینه شناسایی و دسته‌بندی خودکار موسیقی سنتی ایرانی، ضروری است. ازاین‌رو، همکاری بین‌رشته‌ای در اینگونه پژوهش‌ها و استفاده از متخصصان بسیار خبره و ورزیده در هر یک از حوزه‌های فوق، بیش از هر زمانی احساس می‌شود؛ امری که در

[1]. مثلاً میزان شباهت دستگاه ماهور به چهارگاه 73 درصد، همایون به چهارگاه 63 درصد، ماهور و سه‌گاه 60 درصد، شور و همایون 59 درصد و غیره عنوان شده است.

[2]. Macro

[3]. Micro

پژوهش‌های قبلی چنانکه باید مورد توجه واقع نشده است و در متن اینگونه آثار، نوشتار افراد صاحب‌نظر (حداقل در حوزه موسیقی) کمتر به چشم می‌خورد. ازاین‌رو، برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود به‌صورت میان‌رشته‌ای و در قالب طرح پژوهشی کلان و ملی انجام شود؛ به نحوی امکانِ تعامل فکریِ مستمر بینِ موسیقیدانی کاملاً مجرب، که با ریز و بم موسیقی سنتی ایرانی آشنا هستند، با اندیشمندان و متخصصان پردازش سیگنال فراهم آید.

تعارض منافع

گزارش نشده است.

منبع حمایت کننده

این پژوهش برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول است.

References

Abbasi Layegh, M., Haghipour, S. & Najafi Sarem, Y. (2013). Classification of the Radif of Mirza Abdollah a canonic repertoire of Persian music using SVM method, *Gazi University Journal of Science, Part A: Engineering and Innovation*, 1 (4): 57-66.

Abdoli S. (2011). Iranian traditional music Dastgah classification, *12th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2011)*, 275-280.

Abdollahzadegan, S. (2014). *Automatic classification of Iranian traditional music based on scale (Dastgah).* Supervisor: Shahram Jafari. Master's Dissertation, Department of Electrical Engineering, Shiraz University, Shiraz. (Persian)

Abdollahzadegan, S., Jafari, Sh. and Dirand, M. (2014). *Automatic detection of scale (Dastgah)* of *Iranian traditional music based on Recital Performance of Tar and Santur by intelligent extraction of note.* 20th National Annual Conference of Iranian Computer Society. Ferdowsi University, Mashhad. (Persian)

Asadi, H. (2004). Theoretical foundations of Persian classical music: Dastgah as a multi-modal cycle. *Mahoor Music Quarterly*, 6 (22): 43-56. (Persian)

Barkeshli, M. (1961). International Music Congress: conservation of national and folk music traditions. Music-e Iran Magazine, 9 (12). Republished by: *Mmahoor Music Quarterly*, 6 (22), Winter 2004, Pp. 173-193 (Persian)

Bayat, H. (2013). *Classification and Identification of scale (Dastgah) in Iranian music.* Supervisor: Hamed Sajedi. Master's Dissertation, Department of Electronic and Electrical Engineering, Shahed University, Tehran. (Persian)

Beigzadeh, Borhan & Belali Koochesfahani, Mojtaba (2016). Classification of Iranian traditional musical modes (Dastgāh) with artificial neural network. Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics, 2 (2): 107-118.

Behnamnia, B. (2010). Structural study of the Gushes in Nava scale in Mirza Abdollah's repertoire. Supervisor: Hamidreza Ardalan. Master's Dissertation, Iranian Music Performance, Faculty of Music, University of Art, Tehran. (Persian)

Brown, J.C. (1992). Musical fundamental frequency tracking using a pattern recognition method. *Journal of Acoustical Society of America*, September, 92 (3): 425-434.

Darabi, N. (2003). *Producing and analyzing music digital signals: designing Nava scale programming language to produce music pieces and automatic recognition of scales (Dastgahs)* for Persian music, Bachelor's Dissertation, Department of Electrical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran (Persian)

Darabi, N., Azimi, N. H. & Nojumi, H. (2006). Recognition of Dastgah and Maqam for Persian Music with Detecting Skeletal Melodic Models, The second annual IEEE BENELUX/DSP Valley Signal Processing Symposium (SPS-DARTS 2006), Belgium, March. Available via: http://sharif.edu/~nojumi/pubfiles/rdmpmdsmm.pdf

Dawson, M. R. and Yaremchuk, V. (2008). Artificial neural networks that classify musical cords. International journal of cognitive informatics and natural intelligence, vol. 2, issue 3, 22-30

Downie, J.S. (2003). *Annual Review of Information Science and Technology, Chapter 7: Music Information Retrieval*. 295-340.

Fakhraddini, F. (2013). *Analysis and description of Radifs (repertoires) in Iranian Music.* Tehran: Moin and Music Museum of Iran Publishing Co. (Persian)

Gavahian Jahromi, E. (2010). *Persian Music Classification using Pitch Profile Feature.* Supervisor: Hossein Marvi. Advisor: Ali Soleimani. Master's Dissertation, Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood. (Persian)

Hajimolahoseini, H., Amirfattahi, R. & Zekri, M. (2012). Real-time Classification of Persian Musical Dastgahs Using Artificial Neural Network. *The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP 2012)*, 157-160.

Hannaneh, M. (1988). *Lost Scales: A research on the foundations and concepts of Iranian music.* Soroush Publishing Co. (Persian)

Heydarian, P. (1999). *Music note recognition for Santur.* Supervisor: Ehsanollah Kabir, Master's Dissertation, Department of Electrical Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran. (Persian)

Heydarian, P. (2016). *Automatic recognition of Persian musical modes in audio musical signals.* Ph.D. Thesis, supervisors: Lewis Jones and Allan Seago. UK: London Metropolitan University, Faculty of Art, Architecture and Design. June.

Kamalpurtorab, M. (2014). *New approach to Iranian music theory of Alinaghi Vaziri.* Tehran: Nayoney Publishing Co. (Persian)

Kamie, R. (2001). *Music: an appreciation*. Translator: Hossein Yasini. Tehran: Cheshmeh Publishing Co. (Persian)

Kassler, M. (1966). Toward Musical Information Retrieval. *Perspectives of New Music*, Spring & Summer, 4 (2): 59-67.

Khaleghi, R. (2006). *Music Instrument and Speech: Introduction of Iranian music scales (Dastgahs)*, including ten instructional CDs. CD No. 5 and 6. Chaharbagh Bang Institute of Cultural and Art. Tehran (Persian)

Kiani, M. (2014). *Seven scales (Dastgahs) of Iranian music*. Tehran: Sooremehr Publishing Co. (Persian)

Loy, G. (2006). *Musimathics: the mathematical foundations of music*. Volume 1. Massachusetts State: MIT Press.

Mahmoodan, S. (2012). *Automatic classification of audio signals using artificial neural network*. Supervisor: Ayoob Banooshi. Master's Dissertation in Audio Engineering, Department of Broadcasting, IRIB University, Tehran. (Persian)

Mahmoodan, S. and Banooshi, A. (2012). *Automatic classification of Mahoor scale (Dastgah) using artificial neural network*. 2nd Conference of Iranian Society of Acoustics and Vibrations (*ISAV*). Sharif University, Tehran. (Persian)

Mansouri, P. (2011). *The basic theory of music*. 3rd edition. Tehran: Karnameh Publishing Co. (Persian)

Maroufi, M. (1977). *Iranian traditional music scales (Dastgahs) from in Mirza Abdollah's, Agha Hosseingholi's and Darvishkhan's repertoires (Radifs)*. Tehran: Foundation of Iranian Academies, Iran Literature and Arts Academy (Persian)

Nettl, B. (2014). *The Radif of Persian Music: Studies of Structure and Cultural Context*. Translator: Ali Shadkam. Tehran: Sooremehr Publishing Co. (Persian)

Peivandi, J. (2015). *Design an efficient System to Detect Traditional Iranian Music style*. Supervisor: Hadi Soltanizadeh. Master's Dissertation in Artificial Intelligence, Faculty of Electrical and Computer Engineerin, Semnan University, Semnan. (Persian)

Rezakhah, R. (2010). Development and expansion of *melody models in Mirza Abdollah's repertoire*. Supervisor: Majid Kiani. Advisor: Ali Akbar Shekarchi, Master's Dissertation, Iranian Music Performance, Faculty of Music, University of Art, Tehran. (Persian)

Safvat, D. and Caron, N. (2012). Iranian National Music. Translator: Soussan Salimzadeh. Tehran: Aras Publishing Co. (Persian)

Talai, D. (2015). *Radif analysis: based on the Notation of Mirza Abdollah's Radif with Annotated visual description*. Tehran: Ney Publishing Co. (Persian)

Tavakoli, B. (2007). A survey on different theories of Iranian music: Undefined defines. Journal of culture and music, 3 (15): 46-50. (Persian)

Theoretical Fundamentals of Iranian music (2009). Hossein Alizadeh...[et. al]. Tehran: Mahoor Institute of Culture and Arts. (Persian)

Tzanetakis, G. (2015). *Music Information Retrieval (Courseware)*. Available via: http://marsyas.cs.uvic.ca/mirBook/mirBook_jan05_2015.pdf

Tzanetakis, G. & Cook, P. (2002). Musical genre classification of audio signals. IEEE transactions on speech and audio processing, Volume 10, No. 5, Pp. 293-302

Vafaeian, A. (2017). Study on scientific products in music information retrieval in Scopus. Scientometrics Research Journal, Bi-quarterly: Winter and Summer, 3 (5): 30-47. (Persian)

پیوست 1. پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناسایی و دسته‌بندی خودکار دستگاه‌های موسیقی سنتی ایرانی (دانش موضوعی و روش‌شناختی)

دانش موضوعی			دانش روش‌شناختی								یافته‌های پژوهش
پدیدآور (سال)	نوع اثر	رشته تحصیلی	فرکانس نمونه‌برداری (*Fs*) (کیلوهرتز)	طول پنجره فرکانسی (میلی‌ثانیه) و دیگر مشخصات فایل صوتی	طول بُرشِ قطعات[1] (ثانیه)	تعداد قطعات بررسی‌شده	ساز /آواز[2]	شرایط گردآوری داده‌ها[3]	دستگاه‌ها/گام‌های بررسی‌شده	شیوه آموزش (طبقه‌بند)	ویژگی‌های صوتی بررسی‌شده	دقت شناسایی دستگاه‌ها (درصد)
حیدریان، پیمان (1379)	پایان‌نامه کارشناسی ارشد (دانشگاه تربیت مدرس)	مهندسی برق و الکترونیک	8	*mono, bit rate 16 Nf=2048* پنجره مستطیلی	1 ثانیه[4]	130 نُت	سنتور	ضبط نت‌ها	–	–	*Pitch*	شناسایی نت‌ها با دقت 92/96 درصد
دارابی، نیما (1382)	پایان‌نامه کارشناسی (دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی)	مهندسی برق و الکترونیک	-	100 میلی‌ثانیه *(wav, 8 bits)*	–	–	–	–	–	–	*Pitch* (گرفتن *FFT* و استخراج نغمه‌های پُرتکرار قطعه)	–
خواهیان جهرمی، براهیم (1389)	پایان‌نامه کارشناسی ارشد (دانشگاه صنعتی شاهرود)	مهندسی برق و الکترونیک	44/1	512 میلی‌ثانیه *(wav, hamming, 16 bins, single channel)*	20-25 ثانیه	179 قطعه[5]	تار: 55 قطعه سه‌تار: 31 گروه‌نوازی: 26 سنتور: 21 نی: 20 کمانچه: 15 ویولن: 11	لوح فشرده و نوار کاست (از شرکت‌های معتبر موسیقی)	4 گام اصلی	1. فاصله مینکوفسکی (مرتبه 4) 2. محاسبه میزان شباهت بین پروفایل پیچ و 4 الگوی گام	*Pitch Profile*	دقت متوسط کل: 71 درصد سه‌تار: 64/51 گروه‌نوازی: 66/67 سنتور: 81/81 نی: 90 کمانچه: 64/7 ویولن: 54/54

[1]. حداقل زمان مورد نیاز برای هر قطعه، برای شناسایی دستگاه

[2]. به عنوان نوع داده ورودی (فایل صوتی) و متغیر مورد بررسی که تقریباً در همه پژوهش‌ها، به صورت تکنوازی یا تکخوانی (monophonic) انتخاب شده است.

[3]. ضبط در استودیو یا انتخاب از آلبوم‌های منتشر شده در بازار

[4]. برای شناسایی هر نُت (نغمه)

[5]. تعداد قطعات به تفکیک داده‌های آموزشی و تِست مشخص نشده است.

4	**محمودان، سارا (1390)**	پایان‌نامه کارشناسی ارشد (دانشکده صداوسیما، گروه مهندسی رسانه)+ مقاله کنفرانسی (1391: دانشگاه شریف)	مهندسی صدا	44/1	*wav, mono, bit rate 16*	10-5 ثانیه	195 قطعه[1]	سه‌تار	ضبط در استودیو رادیویی (توسط یک نوازنده با کوک معین)	تشخیص ماهور از 5 دستگاه/آواز دیگر	شبکه عصبی مصنوعی از نوع *RBF* (یادگیری نظارت‌شده)	*Pitch* (20 قله برتر در هر پنجره)	شناسایی ماهور با دقت بیش از 70 درصد
5	**بیات، حامد (1392)**	پایان‌نامه کارشناسی ارشد (دانشگاه شاهد)	مهندسی برق و الکترونیک	44/1	100 میلی‌ثانیه	60 ثانیه	80	سنتور	- آلبوم ردیف سنتور صبا - (تعداد کمی) ضبط قطعات	دستگاه شور و آواز افشاری	- شبکه عصبی - حداقل فاصله	*Pitch* (گرفتن *FFT* و استخراج 5 نغمه پُرتکرار از هر گوشه)	میانگین نرخ خطا: - شبکه عصبی: 10/87 - حداقل فاصله: 14/05
6	**عبدالله زادگان، صابر (1393)**	پایان‌نامه کارشناسی ارشد (دانشگاه شیراز)+ مقاله کنفرانسی (1393: دانشگاه فردوسی)	مهندسی برق و الکترونیک	44/1	طول پنجره متغیر و بر اساس شروع فاز حمله انتخاب‌شده است *mp3*	اجرای کامل قطعه (کل قطعه)	46 قطعه (42 قطعه با تار و 4 قطعه با سنتور)	تار و سنتور	ضبط قطعات (توسط اساتید موسیقی با کوک دیاپازن نواخته شده است)	5 دستگاه	- شبکه عصبی از نوع *MLP* (دو لایه میانی و پنج نورون در هر لایه) - *KNN* - *Naïve Bayes*	*Pitch* (استخراج نغمه و تعیین فواصل فرکانسی آن‌ها)	شناسایی دستگاه‌ها با دقت کلی 93 درصد - شبکه عصبی: 61/20 - *KNN*: 73/36 - *Naïve Bayes*: 84/32
7	**پیوندی، جواد (1394)**	پایان‌نامه کارشناسی ارشد (دانشگاه سمنان)	مهندسی کامپیوتر (هوش مصنوعی)	32	30 میلی‌ثانیه *wav*	30 ثانیه	330 قطعه[2] (از 180 گوشه)[3]	سنتور	آلبوم آموزش هفت دستگاه، به نوازندگی مجید کیانی (موسسه فرهنگی سرو ستاه)	7 دستگاه	*HMM (Hidden Markov Model)* (برای یافتن مدل بهینه: الگوریتم *Baum-Welch* و برای ارزیابی کارایی سیستم: *10-fold cross validation*)	- *MFCC* - *ZCR* - *Spectral Rolloff* - *Spectral Flux*	دقت متوسط کل: 74/5 درصد[4]

[1]. فقط درآمد هر دستگاه بررسی شده است. از این تعداد 135 قطعه (70 درصد) برای آموزش و 60 قطعه (30 درصد) به عنوان دادهٔ تست و آزمون شبکه استفاده شده است.

[2]. شور: 100 گوشه؛ ماهور: 50 گوشه؛ همایون، سه‌گاه و چهارگاه هر کدام 40 گوشه؛ دستگاه نوا و راست‌پنجگاه نیز هر کدام 30 گوشه

[3]. با الگو گرفتن از پایگاه داده GTZEN، طول زمانی کلیه قطعات، به فاصله یکسان 30 ثانیه‌ای بُرش داده شده‌اند. بر این اساس 180 گوشه، به 330 قطعهٔ 30 ثانیه‌ای تبدیل شده است.

[4]. شور 82، سه‌گاه 81، چهارگاه 79، ماهور 77، راست‌پنجگاه 73، نوا 69 و اصفهان 61 درصد

8	**دارابی، نیما؛ عظیمی، حامد و نجومی، حسن (2006)**	مقاله کنفرانسی (دانشگاه شریف)	مهندسی برق و الکترونیک- علوم ریاضی	–	–	–	70 قطعه (30 گوشه/ملودی در همایون)	–	–	دستگاه همایون	شبکه عصبی مصنوعی با یک لایه، با الگوریتم یادگیری *back propagation*	*- Pitch* (گرفتن *FFT* و استخراج نغمه‌های پُرتکرار از هر گوشه) *- Melody Model - Statistical Features: Tonic, Smoothness, etc.*	میانگین نرخ خطا: 28/2 درصد
9	**عبدلی، سجاد (2011)**	مقاله کنفرانسی (*ISMIR*)	مهندسی الکترونیک و کامپیوتر	هر قطعه متفاوت از دیگری بوده است	45 میلی‌ثانیه	حدود 60 ثانیه	210 گوشه	آواز (سه استاد برجسته) و تعداد کمی سنتور، تار، سه‌تار و کمانچه	لوح فشرده و نوار کاست	5 دستگاه	منطق فازی نوع 2	*Pitch*	- شناسایی دستگاه‌ها با دقت کلی 85 درصد - بیشترین شباهت بین دو دستگاه ماهور و چهارگاه (85 درصد) - کمترین شباهت بین دو دستگاه سه‌گاه و چهارگاه (43 درصد)
10	**حاجی ملاحسینی، حمید؛ امیرفتاحی، رسول و ذکری، مریم[1] (2012)**	مقاله کنفرانسی (*AISP*)	مهندسی الکترونیک و کامپیوتر	مشخص نیست	مشخص نیست	مشخص نیست	مشخص نیست	مشخص نیست	مشخص نیست	5 دستگاه	شبکه عصبی مصنوعی (سه‌لایه)	*Pitch*	دقت تشخیص 100 درصد همه دستگاه‌ها!
11	**عباسی لایق، محمود؛ حقی‌پور، سیامک و نجفی سارم، یزدان[2] (2013)**	مقاله نشریه	مهندسی برق و الکترونیک و زیست پزشکی	44/1	3 ثانیه	20 ثانیه	250 گوشه از ردیف میرزاعبدالله	تار و سه‌تار (چهار نوازنده نامشخص)	برگرفته از پنج لوح فشرده	(12 دستگاه/آواز + آواز بیاتِ‌کُرد[3])	طبقه‌بند اصلی: *SVM* دیگر روش‌ها: *KNN* و *MLP*	*-Pitch - MFCC – Inharmonicity - Spectral Centroid*	برتری تابع هسته *RBF* در طبقه‌بند *SVM* نسبت به دیگر روش‌ها. دقت شناسایی در روش *RBF* بین 65 تا 95 درصد برای دستگاه‌های مختلف

[1]. Hajimolahoseini, Amirfattahi, & Zekri

[2]. Abbasi Layegh, Haghipour, Najafi Sarem

[3]. در این پژوهش، علاوه بر 12 دستگاه و آواز رایج و معمول، آوازِ کُردبیات نیز به عنوان آواز مستقل درنظر گرفته شده است؛ این درحالی است که بیشتر ردیف‌ها، کُردبیات یا بیاتِ‌کُرد به عنوان یکی از گوشه‌های دستگاه شور آمده است. (همانطور که در بخش 2-2-8. گوشه نیز گفته شد) نغمه شاهد بیاتِ‌کُرد همان درجه پنجم گام شور بوده و شباهت زیادی به آواز دشتی دارد و همچنین، به طور مکرر به دستگاه شور رجعت می‌کند.

12	**بیگ‌زاده، برهان و بلالی کوچ اصفهانی، (2016)**	مقاله نشریه	مهندسی مکانیک	44/1	*wav, bit rate 8*	10-20 ثانیه	348 قطعه[2]	نی، ویلن و آواز	- آلبوم خوانندگان قدیمی - ضبط برای سازهای نی و ویلن	7 دستگاه	شبکه عصبی مصنوعی سه‌لایه از نوع *MLP*، 30 نورون در لایه پنهانی (یادگیری نظارت‌شده)	*Pitch* (20 قله برتر یا ماکزیمم محلی در هر پنجره با الگو گرفتن از پژوهش محمودان)	- ویولن: 72 درصد - نی: 65 درصد - آواز: 56 درصد
13	**حیدریان، پیمان[3] (2016)**	پایان‌نامه دکتری (دانشگاه متروپولیتن لندن)	برق و الکترونیک، موسیقی	_	92/9 میلی‌ثانیه *hann window* بدون همپوشانی	_	- سنتور: 104 گروه‌نوازی: 22 - کمانچه: 11 - پیانو: 7	سنتور 11 و 12 خرک (اصلی) - تعداد کمی برای سازهای کمانچه، نی و گروه‌نوازی	- ضبط قطعات (برای سنتور)	5 دستگاه	- *Manhattan Distance* (اصلی) - *GMM* - *Cross Correlation*	- *Pitch Histogram* - *Chroma* - *Spectral Avarage*	_

[1]. Beigzadeh & Belali Koochesfahani

[2]. 264 قطعه (75 درصد) برای آموزش و 84 قطعه (25 درصد) به عنوان دادهٔ تست و آزمون شبکه استفاده شده است.

[3]. Heydarian, Peyman