مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 63-69

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی ورودی ساز نی به روش بازتاب‌سنجی پالس

ادریس محمدی تلوار[1]، ایوب بنوشی[2*]، محسن بروغنی[1]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صدا، دانشگاه صدا و سیما، تهران
2- استادیار، مهندسی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران
* تهران، صندوق پستی 1339- 14155، abanoushi@aeoi.org.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 بهمن 1394
پذیرش: 10 فروردین 1395
ارائه در سایت: 18 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:
امپدانس اکوستیکی
بازتاب‌سنجی پالس
ساز نی
کوک‌ساز
انگشت‌گذاری

چکیده

بررسی تغییرات بسامدی امپدانس اکوستیکی می‌تواند نقش مهمی در شناسایی و بهینه‌سازی یک ساز داشته باشد. برای یک لولهٔ ساده امپدانس اکوستیکی ورودی با روش‌های تحلیلی قابل محاسبه است، اما برای اشکال هندسی پیچیده مثل سازهای بادی نمی‌توان امپدانس اکوستیکی ورودی را با روش‌های تحلیلی به سادگی محاسبه کرد؛ از این‌رو، امپدانس اکوستیکی ورودی سازهای بادی را اندازه می‌گیرند. این مقاله، گزارش نخستین آزمایشی است که برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی ورودی یک نی دوی دیاپازون انجام می‌گیرد. به این منظور، یک دستگاه بازتاب‌سنج پالس ساخته شد. برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه، ابتدا امپدانس اکوستیکی ورودی یک لولهٔ پله‌دار سه بخشی اندازه‌گیری شد و نتایج اندازه‌گیری با مقادیر محاسبه‌شدهٔ توسط فرمول‌های به‌خوبی شناخته شده، مقایسه شد. در محدودهٔ بسامدهای مورد نظر عمل‌کرد دستگاه کاملا قابل قبول بود. سپس امپدانس اکوستیکی ورودی ساز نی برای انگشت‌گذاری‌های مختلف در شش حالت، از بسته بودن تمام سوراخ‌پرده‌ها تا بازبودن تمامی آن‌ها، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که، برخلاف آن‌چه که در سازی مانند فلوت دیده می‌شود، بسامد کمینه‌های منحنی امپدانس منطبق بر بسامدهای نت‌های قابل نواختن نظیر نیست. علت را می‌توان در نقش اساسی دهان در تولید نغمه‌های نی دانست.

Input acoustic impedance measurement of Ney with Pulse reflectometry method

Edris Mohammady Talvar[1], Ayoub Banoushi[2*], Mohsen Broghany[1]

1- Department of Sound Engineering, IRIB University, Tehran, Iran
2-Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
* P.O.B. 14155-1339, Tehran, Iran, abanoushi@aeoi.org.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 January 2016
Accepted 29 March 2016
Available Online 07 May 2016

Keywords:
Acoustic impedance
Pulse reflectometry
Ney
Tuning
Fingering

ABSTRACT

Investigation of frequency variations of acoustic impedance can play an important role in identification and optimization of a musical instrument. For a simple tube, the input acoustic impedance can be calculated by analytical methods; for complex geometry objects like wind instrument, however, it cannot be simply computed. Therefore, the impedance is measured for wind instruments. This paper is a report of the first experiment for measuring the input acoustic impedance of Ney (an Iranian woodwind instrument). For this purpose, a pulse reflectometer device was made. To ensure correct operation of the reflectometer, in the first step, the input acoustic impedance of a three sections step tube was measured and the results were compared with calculated results using a well-known formula. The acoustic impedances of a Do-ney for various fingering in six case (from all holes closed to all holes opened) were measured. The results show that, contrary to what was seen for flute, the frequencies of minima of the impedance curves have some discrepancies with the frequencies of corresponding playable notes. This may be related to the role of the mouth of the instrument player in producing tones of ney.

1- مقدمه

امپدانس اکوستیکی کمیتی است که در همهٔ حوزه‌های اکوستیک کم و بیش اهمیت دارد؛ به‌ویژه درلوله‌ها و اشیاء لوله مانندی مثل سازهای بادی. امپدانس اکوستیکی عبارت است از نسبت فشار اکوستیکی (P) به جریان حجمی هوا (U). در عمل امپدانس اکوستیکی یک لوله به عواملی مثل طول، جنس، تلفات حرارتی، و شعاع لوله بستگی دارد و می‌توان آن را محاسبه، یا اندازه‌گیری کرد. مشکل این‌جاست که در حالت کلی امپدانس اکوستیکی مانند امپدانس الکتریکی تابعیت بسامدی دارد. این تابعیت باعث پیچیدگی در محاسبات و اندازه‌گیری می‌شود. امپدانس اکوستیکی یک لولهٔ ساده را می‌توان محاسبه کرد، اما این محاسبه برای سازهای بادی اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است؛ از این‌رو امپدانس اکوستیکی این سازها معمولا اندازه‌گیری می‌شود.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی وجود دارد، از جمله روش تک‌میکروفنه با منبع جریان حجمی، روش بازتاب‌سنجی پالس، روش دو میکروفنی، روش منبع جریان حجمی با میکروفن بالادست، روش دو بادسنجی، روش میکروفن و بادسنج، و روش چند میکروفنه [1]. از این میان، روش بازتاب‌سنجی پالس به دلیل استفاده از یک میکروفن و یک بلندگو، عدم نیاز به کالیبراسیون، محاسبات ساده، پیاده‌سازی آسان، و دقت قابل‌قبول در

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
E. Mohammady Talvar, A. Banoushi, M. Broghany, Input acoustic impedance measurement of Ney with Pulse reflectometry method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 63-69, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]

اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی، می‌تواند ترجیح داده شود.

روش بازتاب‌سنجی پالس اکوستیکی کاربردهای گوناگونی دارد. این روش ابتدا در مطالعات زلزله‌شناسی برای بررسی لایه‌بندی پوستهٔ زمین [2]، و سپس در پزشکی به‌عنوان روشی برای اندازه‌گیری ابعاد مسیرهوایی در دهان به‌کار برده شد [3]. در نخستین تجربه برای اندازه‌گیری پاسخ ضربهٔ اکوستیکی یک ساز بادی به روش بازتاب‌سنجی پالس از منبع تخلیهٔ هاله‌ای به‌عنوان منبع تحریک استفاده شد [4]، سپس یک تراگذار پیزوالکتریک جایگزین این منبع شد [6,5]. نخستین تجربهٔ استفاده از بلندگو به‌عنوان منبع تحریک برای اندازه‌گیری پاسخ ضربه در سازهای بادی را داین گزارش کرده است [7]. مزیت استفاده از بلندگو امکان تولید پالس‌های تحریک مشابه است. تولید پالس‌های مشابه امکان متوسط‌گیری از پالس‌های تولیدشده و بازتاب‌های آن از لولهٔ تحت‌سنجش را فراهم می‌کند. این متوسط‌گیری به‌منظور بهبود نسبت سیگنال به نویز صورت می‌گیرد.

استفاده از روش بازتاب‌سنجی پالس برای ترسیم منحنی‌های امپدانس اکوستیکی ورودی چند ساز بادی را واتسن در سال 1989 گزارش کرد [8]. مشکل استفاده از روش بازتاب‌سنجی پالس اکوستیکی برای اندازه‌گیری امپدانس سازهای بادی، محدودیت آن در اندازه‌گیری سازهای با بوری[1] دراز است؛ هرچند روشی برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی سازهای با طول بیش‌تر از 1متر هم ارائه شده است [9]. در این روش، با استفاده از الگوریتم‌های کنترل فعال نویز[2] امکان اندازه‌گیری امپدانس سازهایی با درازای تا حدود 4 متر فراهم می‌شود.

دراین مقاله، نتایج اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی ساز نی به روش بازتاب‌سنجی پالس ارائه می‌شود. به این منظور، ابتدا در بخش 2، تئوری محاسبهٔ امپدانس اکوستیکی یک لوله مرور می‌شود؛ در بخش 3، تجهیزات طراحی و ساخته‌شده برای انجام آزمایش، و در بخش 4، ساز نی و بعضی مشخصه‌های آن معرفی می‌شود؛ در بخش 5 نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده ارائه می‌شود؛ و بالاخره، در بخش 6 نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها خلاصه می‌شود.

2- محاسبهٔ امپدانس اکوستیکی لوله‌ها

در یک لولهٔ ساده مانند آن‌چه در شکل 1 نشان داده شده، امپدانس اکوستیکی ورودی (Z_{in}) به‌صورت معادلهٔ (1) محاسبه می‌شود [9]:

$$Z_{\mathrm{in}} = \frac{\rho\omega}{k'\pi r^2}\left(\frac{0.25k'^2r^2 + \mathrm{j}(0.6k'r + \tan k'l)}{(1 - 0.6k'r\tan k'l) + \mathrm{j}0.25k'^2r^2\tan k'l}\right) \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی هوا، ω بسامد زاویه‌ای، k' ثابت انتشار، r شعاع لوله، و l طول لوله است.

برای یک لولهٔ پله‌دار، مانند آن‌چه در شکل 2 نشان داده شده، امپدانس ورودی کمی پیچیده‌تر است و به‌صورت معادله‌های (2-4) به‌دست می‌آید.

$$Z_{\mathrm{C}} = \frac{\rho\omega}{k'\pi r_3^2}\left(\frac{0.25k'^2r_3^2 + \mathrm{j}(0.6k'r_3 + \tan k'l_3)}{(1 - 0.6k'r_3\tan k'l_3) + \mathrm{j}0.25k'^2r_3^2\tan k'l_3}\right) \quad (2)$$

$$Z_{\mathrm{B}} = \frac{\rho\omega}{k'\pi r_2^2}\left(\frac{\frac{Z_{\mathrm{C}}k'\pi r_2}{\rho\omega} + \mathrm{j}\tan k'l_2}{1 + \mathrm{j}\frac{Z_{\mathrm{C}}k'\pi r_2^2}{\rho\omega}tank'l_2}\right) \quad (3)$$

$$Z_{\mathrm{A}} = \frac{\rho\omega}{k'\pi r_1^2}\left(\frac{\frac{Z_{\mathrm{B}}k'\pi r_1}{\rho\omega} + \mathrm{j}\tan k'l_1}{1 + \mathrm{j}\frac{Z_{\mathrm{B}}k'\pi r_1^2}{\rho\omega}\tan k'l_1}\right) \quad (4)$$

[1] لولهٔ اصلی ساز که در زبان انگلیسی Bore گفته می‌شود.

[2] Active Noise control

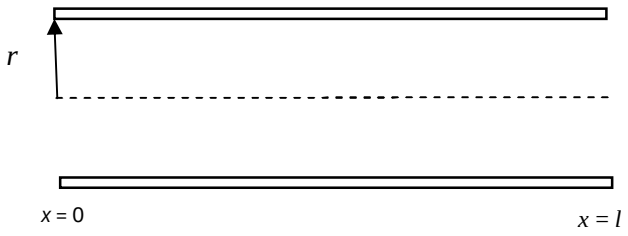

Fig. 1 A simple cylinder

شکل 1 لولهٔ ساده

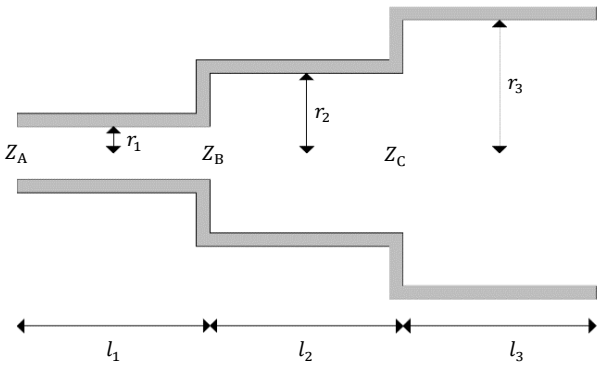

Fig. 2 Sketch of a stepped tube with two discontinuities. Each discontinuity made a reflection [9]

شکل 2 طرحی از یک لولهٔ پله‌دار با دو ناپیوستگی. هر ناپیوستگی بازتابی ایجاد می‌کند [9]

ثابت انتشار k' در این معادلات عبارت است از

$$k' = k + j\alpha = \frac{\omega}{c} - \mathrm{j}\frac{1}{rc}\left(\sqrt{\frac{\eta\omega}{2\rho}} + (\gamma - 1)\sqrt{\frac{\kappa\omega}{2\rho c_{\mathrm{p}}}}\right) \quad (5)$$

که در آن، $c = 331.6\sqrt{1 + \tau/273}\ \mathrm{m/s}$ سرعت صدا در هوایی با دمای τ، η ضریب چسبندگی برشی هوا، γ نسبت گرماهای ویژه، κ رسانایی حرارتی هوا، و c_{p} گرمای ویژهٔ هوا در فشار ثابت است.

3- ساخت دستگاه بازتاب‌سنج پالس اکوستیکی

محاسبات بخش 2، در عمل برای یافتن امپدانس ورودی لوله‌هایی با دیواره‌های به‌نسبت نرم و متخلخل به‌کار نمی‌آید. بیشتر سازها، به‌ویژه ساز نی، آن‌طور که در بخش بعدی مشاهده می‌شود، چنین ساختاری دارند؛ پس برای تعیین امپدانس اکوستیکی ورودی آن‌ها باید به شبیه‌سازی یا به‌تر از آن اندازه‌گیری پرداخته شود. یکی از روش‌های اندازه‌گیری، بازتاب‌سنجی پالس است.

3-1- تئوری بازتاب‌سنجی

در روش بازتاب‌سنجی پالس، دهانهٔ لوله توسط یک پالس ضربه‌ای تحریک، و نخستین پالس بازتابیده‌شده به دهانهٔ لوله اندازه‌گیری می‌شود. این پالس بازتابیده حاوی اطلاعات لازم برای استخراج امپدانس اکوستیکی ورودی لوله است، که با عملیات ریاضی‌ای به‌نسبت ساده قابل استخراج است [9].

شکل 3 نمودار بستهٔ تجهیزات لازم برای این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. یک پالس سوزنی با پهنای حدود 80 µs توسط یک رایانه تولید و توسط یک تقویت‌کننده به بلندگو خورانده می‌شود. (در عمل تولید یک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]

سیگنال ضربه، آن‌طور که در تئوری دلتای دیراک گفته می‌شود، غیرممکن است) پالس صوتی تولیدشده توسط بلندگو به یک لولهٔ واسطه به‌نام لولهٔ منبع وارد می‌شود. لولهٔ تحت‌سنجش به سر دیگر لولهٔ منبع متصل می‌شود. جایی به فاصلهٔ L1 از بلندگو و به فاصلهٔ L2 از ورودی لولهٔ تحت‌سنجش میکروفونی بر دیوارهٔ لولهٔ منبع تعبیه می‌شود. این میکروفن وظیفهٔ برچیدن موج صدای بازتابی را بر عهده دارد. مقادیر L1 و L2 بسیار مهم هستند و باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که تفکیک نخستین پالس بازتابی از پالس ورودی و سایر بازتاب‌ها ممکن شود.

باید توجه داشت که پالس بازتابی در عمل مسیر L2 را نیز طی می‌کند و سپس به میکروفن می‌رسد. با توجه به این‌که هدف اندازه‌گیری امپدانس ورودی جسم تحت سنجش است، باید اثر بخش L2 حذف شود. به این منظور، اندازه‌گیری باید در دو حالت انجام شود، یکی هنگام اتصال جسم آزمون و دیگری وقتی که انتهای لولهٔ منبع بسته می‌شود. با دی‌کانوالو کردن خروجی میکروفن در هردوی این حالت‌ها، اثر L2 حذف می‌شود و پاسخ ضربهٔ ورودی جسم به‌شکل معادلهٔ (6) به‌دست می‌آید [9].

$$IIR\left[e^{j\theta}\right] = \frac{R\left[e^{j\theta}\right]I^{*}\left[e^{j\theta}\right]}{I\left[e^{j\theta}\right]I^{*}\left[e^{j\theta}\right] + q} \quad (6)$$

در رابطهٔ (6)، $IIR\left[e^{j\theta}\right]$ پاسخ ضربهٔ ورودی جسم تحت‌سنجش است. $R\left[e^{j\theta}\right]$ نخستین بازتاب در حالت لولهٔ منبع بسته، $I\left[e^{j\theta}\right]$ نخستین بازتاب در حالت اتصال جسم تحت‌سنجش، و $I^{*}\left[e^{j\theta}\right]$ مزدوج مختلط آن در حوزهٔ بسامد است. q عدد بسیار کوچکی‌ست که از صفرشدن مخرج جلوگیری می‌کند.

پاسخ ضربه‌ای که به‌شکل رابطهٔ (6) به‌دست می‌آید حاوی اطلاعات مفیدی در مورد ساختار جسم تحت‌سنجش است. اگر این جسم یک ساز بادی باشد، به‌کمک این پاسخ ضربه، می‌توان ساختار داخلی ساز و به‌ویژه امپدانس اکوستیکی ورودی آن را استخراج کرد. رابطهٔ (7) ارتباط امپدانس اکوستیکی ($Z_{\mathrm{in}}\left[e^{j\theta}\right]$) با پاسخ ضربهٔ اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد.

$$Z_{\mathrm{in}}\left[e^{j\theta}\right] = \frac{P_{0,\mathrm{r}}\left[e^{j\theta}\right]}{U_{0,\mathrm{r}}\left[e^{j\theta}\right]} = Z_0 \times \frac{1 + IIR\left[e^{j\theta}\right]}{1 - IIR\left[e^{j\theta}\right]} \quad (7)$$

که در آن $P_{0,\mathrm{r}}\left[e^{j\theta}\right]$ فشار صدای ورودی، $U_{0,\mathrm{r}}\left[e^{j\theta}\right]$ سرعت حجمی ورودی، Z_0 امپدانس مشخصهٔ لولهٔ منبع، و $IIR\left[e^{j\theta}\right]$ پاسخ ضربهٔ اندازه‌گیری شده‌است.

3-2- بازتاب سنج ساخته‌شده

در شکل 4 بازتاب‌سنج ساخته شده نشان داده شده است. در این بازتاب‌سنج

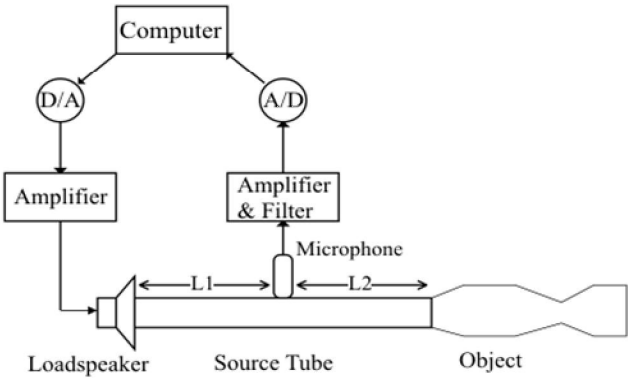

Fig. 3 Close Schema of a pulse reflectometer which used in practical [9]

شکل 3 نمودار بستهٔ یک بازتاب‌سنج پالس که در عمل استفاده می‌شود [9]

Fig. 4 Practical pulse reflectometer which made for measuring input impedance of ney. The ney under investigation is seen at the end of source tube

شکل 4 بازتاب‌سنج پالس ساخته‌شده برای اندازه‌گیری امپدانس ورودی ساز نی. ساز نی تحت‌سنجش در انتهای لولهٔ منبع دیده می‌شود

فاصلهٔ بلندگو تا میکروفن L1=3.37m و فاصلهٔ میکروفن تا انتهای لولهٔ منبع L2=3.35m است. حلقه‌ای کردن لولهٔ منبع برای کاهش فضای اشغال‌شده و استفادهٔ آسان‌تر از تجهیزات است. تجهیزات استفاده شده در بازتاب‌سنج ساخته شده عبارت است از: بلندگو 8 اهمی به شماره سریال (C065FT002)، میکروفن Beyerdynamic MCE 5، کارت صدای لپ‌تاپ مدل DELL 5110، و آمپلی‌فایر ALTEC 1593B.

4- نی، ساز چوبین‌بادی ایرانی

نی یکی از قدیمی‌ترین سازهای چوبین‌بادی ایرانی است. نی ساقه‌ای از گیاه نی است که از شش جا سوراخ (سوراخ‌پرده) می‌شود. به‌طور معمول قطر هر سوراخ‌پرده با قطر داخلی لولهٔ اصلی ساز مساوی است. نوازنده با انگشت‌گذاری روی سوراخ‌پرده‌ها طول مؤثر لوله، و از این راه نغمهٔ نواخته‌شده را کنترل می‌کند. شکل 5 یک نمونه نی با کوک دوی دیاپازون را نشان می‌دهد.

ساز نی [10] برخلاف برخی از سازهای بادی دیگر فاقد قمیش یا قطعهٔ دهانی است، ساز از طریق زبان، لب‌ها، دندان‌های پیشین، و یک تکه لولهٔ کوتاه در دهانهٔ نی تحریک می‌شود. لولهٔ کوتاه دهانهٔ نی از مس یا طلق پلاستیکی است. ساز نی از نظر نوازندگی یعنی شیوهٔ تحریک شبیه به ساز فلوت است، چون در هردوی آن‌ها از تندباد (air jet) برای تحریک ساز استفاده می‌شود.

5- نتایج

5-1- صحه‌گذاری عملکرد بازتاب‌سنج ساخته‌شده

برای اطمینان از صحت عملکرد بازتاب‌سنج ساخته‌شده، امپدانس اکوستیکی یک لولهٔ پله‌دار مانند شکل 2 و با مشخصات جدول 1 اندازه‌گیری، و با مقادیر محاسبه‌شده توسط معادلات (2-5) مقایسه شد. این اندازه‌گیری 64 بار انجام شد و میانگین امپدانس این 64 بار با حل تحلیلی امپدانس‌اش مقایسه شد، نتیجهٔ این مقایسه در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش 3-1 گفته شد در اندازه‌گیری‌ها از یک پالس سوزنی با پهنای زمانی حدود 80μs برای تحریک سیستم استفاده شده‌است. این پهنای زمانی خیلی کم، در پالس تولیدی انرژی خیلی کمی را به سیستم تزریق می‌کند، در نتیجه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]

حساسیت بازتاب‌سنج را به نویز محیط افزایش می‌دهد. به همین علت تمام آزمایش‌ها در استودیو دانشگاه صدا و سیما انجام شد. برای افزایش انرژی سیگنال تزریقی به سیستم، و اطمینان از صحت عملکرد دستگاه (شامل بلندگو، میکروفن، کارت صدا) از محیط استودیویی استفاده شد و هر آزمایش 64 بار تکرار شد. میکروفن و بلندگو استفاده شده کالیبره نشده‌اند، اما تکرار آزمایش‌ها ثابت کرد که در محدودهٔ بسامدی مورد نظر یعنی حدود 250Hz تا 1600Hz بلندگو، میکروفن، و کارت صدای داخلی لپ‌تاپ مورد استفاده پاسخ بسامدی ثابت و مناسبی داشته است.

آن‌گونه که در شکل 6 دیده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج اندازه‌گیری و مقادیر محاسبه‌شده وجود دارد. برای تسهیل مقایسه، مقدار اختلاف بسامدهای نظیر به اکسترمم‌های منحنی‌های امپدانس اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در جداول 2 و 3 فهرست شده است.

5-2- امپدانس اکوستیکی ورودی ساز نی

پس از اطمینان از صحت عمل‌کرد دستگاه، امپدانس اکوستیکی نی برای انگشت‌گذاری‌های مختلف اندازه‌گیری شد. شکل 7 امپدانس اکوستیکی ساز

Fig. 5 A Do-ney. This instrument consists of seven sections and six tone holes. The sixth tone hole is behind of the fourth section and its position is shown with a circle

شکل 5 یک نی کوک دوی دیاپازون. این ساز از هفت بند و شش سوراخ‌پرده تشکیل شده است. سوراخ‌پردهٔ ششم در پشت بند چهارم قرار گرفته، و با یک دایره جای آن روی شکل مشخص شده است

جدول 1 مشخصات لولهٔ پله‌داری که امپدانس آن در شکل 6 نشان داده شده است

Table 1 Characteristic of stepped tube which its impedance is shown in figure 6

شمارهٔ بخش	طول (mm)	قطر داخلی (mm)
1	50	10.22
2	129	12.48
3	177	18.1

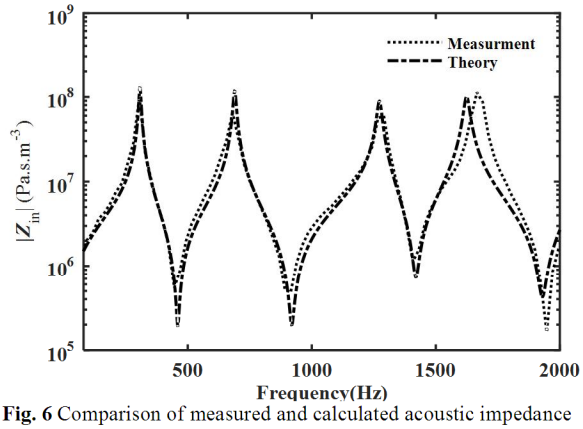

Fig. 6 Comparison of measured and calculated acoustic impedance curves of a stepped tube. The physical characteristics of tube have been listed in table 1

شکل 6 مقایسهٔ منحنی‌های امپدانس اکوستیکی اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شدهٔ یک لولهٔ پله‌دار. مشخصات لوله در جدول 1 فهرست شده است

جدول 2 مقدار انحراف بسامدهای نظیر به کمینه‌های‌منحنی امپدانس اندازه‌گیری شده از مشابه محاسبه شدهٔ آن‌ها

Table 2 The differences between the measured and calculated frequencies of impedance minima

شمارهٔ کمینه	بسامد محاسبه شده (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (٪)
1	459.7	455.7	-3.05
2	919.7	915	-0.51
3	1420	1408	-0.85
4	1930	1947	-0.88
5	2395	2440	1.75

جدول 3 مقدار انحراف بسامدهای نظیر به بیشینه‌های منحنی امپدانس اندازه‌گیری شده از مشابه محاسبه شدهٔ آن‌ها

Table 3 The differences between the measured and calculated frequencies of impedance peaks

شمارهٔ بیشینه	بسامد محاسبه شده (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (٪)
1	307.3	305	-0.75
2	689.2	680.4	-1.28
3	1273	1290	1.34
4	1624	1666	2.59
5	2181	2323	6.51

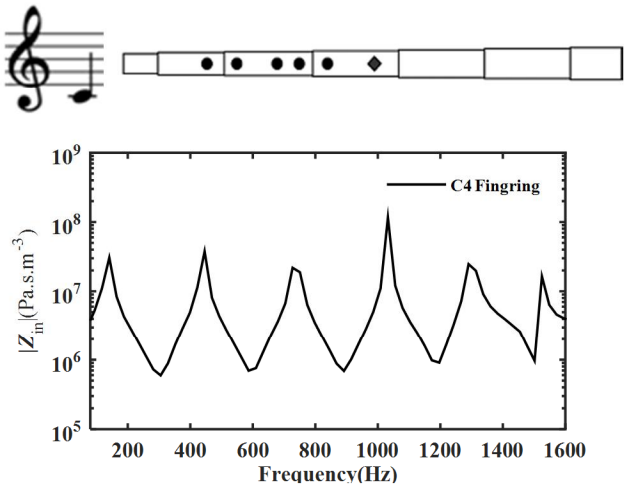

Fig. 7 Acoustic impedance of a Do-ney for C4 note fingering. The fingering of C4 note has been indicated. In this situation, all tone holes should be stopped

شکل 7 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت‌گذاری نت C4. حالت انگشت‌گذاری نت C4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داد شده است. در این حالت تمام سوراخ‌های روی ساز باید مسدود باشد

نی را برای انگشت‌گذاری نت C4 نشان می‌دهد. در این انگشت‌گذاری همهٔ سوراخ‌های نی بسته می‌شود. سوراخ لوزی شکل سوراخ پشتی نی است.

باتوجه به رابطهٔ امپدانس اکوستیکی $Z=\frac{P}{U}$، در نقاط بیشینه فشار اکوستیکی (p) و در نقاط کمینه جریان حجمی (U)، بیش‌ترین مقدار را دارد. در سازهای بادی، بسته به نوع تحریک ساز، بسامدهای تشدید در نقاط بیشینه یا کمینه نمایان می‌شود. اگر تحریک ساز با قمیش صورت گیرد، به‌دلیل مسدود شدن یک طرف ساز بادی با دهان و قمیش، تشدیدهای هماهنگ این ساز بادی در نقاط بیشینهٔ منحنی امپدانس ظاهر می‌شود [12,11]. اما در سازی مانند فلوت، چون بوری ساز از طریق تندباد تحریک می‌شود و نقطهٔ تحریک به هوا راه دارد، تشدیدها در نقاط کمینه ظاهر می‌شود [12,11].

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]

در ساز نی نیز به‌مانند فلوت تندباد عامل تحریک ساز است و نی مانند یک لولهٔ دو سر باز عمل می‌کند. بنابراین بسامدهای تشدید آن بر روی کمینه‌های منحنی امپدانس اکوستیکی می‌افتد. جدول 4 مقدار بسامدهای کمینهٔ چهار تشدید اول شکل 7 را در مقایسه با بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا در این انگشت‌گذاری نشان می‌دهد.

شکل‌های 8 تا 12 امپدانس اکوستیکی اندازه‌گیری‌شده برای ساز نی را در انگشت‌گذاری‌های نظیر، به‌ترتیب، نت D4، نت E4، نت F4، نت F#4، نت G4، و نت A4 را نشان می‌دهند. نحوهٔ انگشت‌گذاری برای این نت‌ها نیز در بالای شکل‌ها دیده می‌شود.

جدول‌های 5 تا 9 مقدار بسامدهای کمینهٔ چهار تشدید اول شکل‌های، به‌ترتیب، 8 تا 12 را در مقایسه با بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا در انگشت‌گذاری‌های مربوطه نشان می‌دهد.

منحنی شکل 10 دارای سه کمینه است، درحالی‌که جدول 7 نشان می‌دهد که درعمل چهار نت را در این انگشت‌گذاری می‌توان نواخت. این نت

جدول 4 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا با انگشت‌گذاری C4

Table 4 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with C4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامد پایهٔ نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	C4	261.63	305	16.58
2	C5	523.25	586.5	12.09
3	G5	783.99	891.5	13.71
4	C6	1046.5	1196	14.29

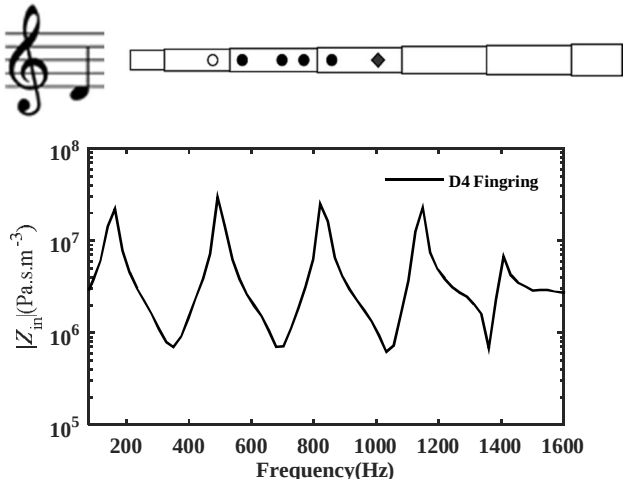

Fig. 8 Acoustic impedance of Do-ney for D4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, only the first tone hole of ney should be opened

شکل 8 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت گذاری نت D4. حالت انگشت گذاری نت D4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داد شده است. در این حالت تنها اولین سوراخ نی باید باز باشد

جدول 5 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا با انگشت‌گذاری D4

Table 5 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with D4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامدپایهٔ نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	D4	293.66	351.9	19.83
2	D5	587.32	703.8	19.83
3	A5	880	1032	17.27
4	D6	1174.7	1361	15.86

جدول 6 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا با انگشت‌گذاری E4

Table 6 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with E4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامدپایهٔ نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	E4(kron)	327	398.8	22
2	E5(kron)	633	774.2	22.31
4	B5(kron)	978	1173	19.93
4	E6(kron)	1265	1501	18.66

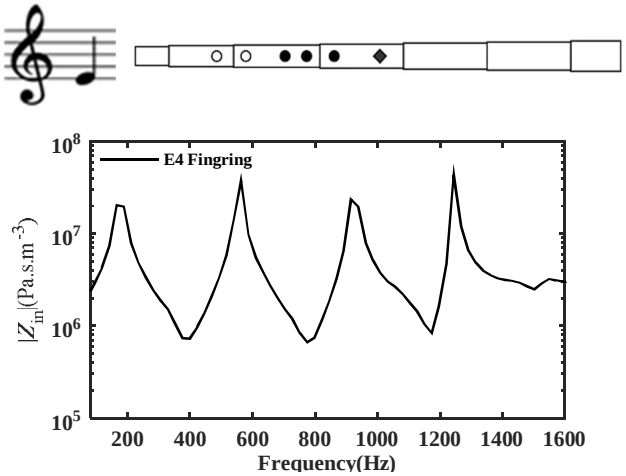

Fig. 9 Acoustic impedance of a Do-ney for E4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, only the first and second tone holes should be opened

شکل 9 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت گذاری نت E4. حالت انگشت گذاری نت E4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داد شده است. در این حالت تنها اولین و دومین سوراخ نی باید باز باشد

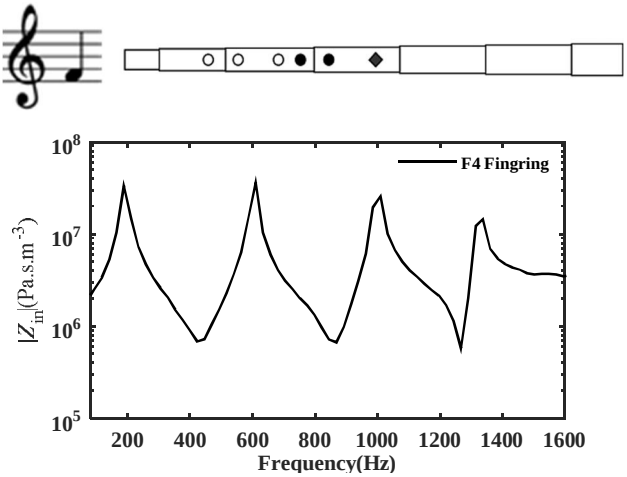

Fig. 10 Acoustic impedance of Do-ney for F4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, only the first, second, and third tone holes should be opened

شکل 10 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت گذاری نت F4. حالت انگشت‌گذاری نت F4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داده شده است. در این حالت تنها اولین، دومین، و سومین سوراخ نی باید باز باشد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]

جدول 7 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا با انگشت‌گذاری F4

Table 7 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with F4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامد نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	F4	349.23	422.3	20.92
2	F5	698.46	868	24.27
3	C5	1046.5	1267	21.07
4	F6	1396.9	-	-

جدول 8 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا با انگشت‌گذاری F#4

Table 8 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with F#4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامد نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	F#4	369.99	455.7	23.17
2	F#5	698.46	868	24.27
3	C#5	1046.5	1290	23.27

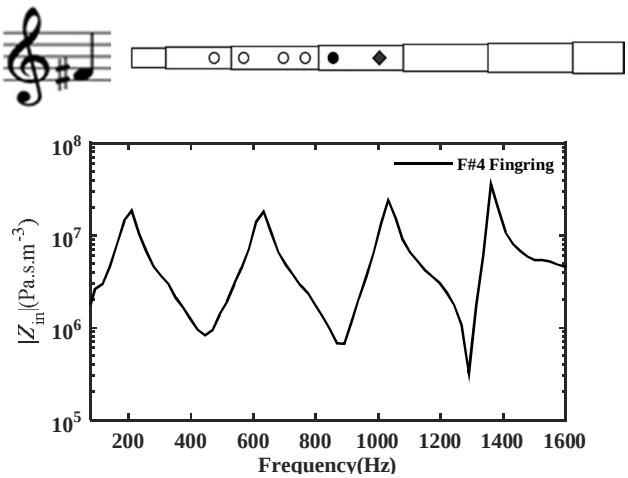

Fig. 11 Acoustic impedance of Do-ney for F#4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, only the first, second, third, and fourth tone holes should be opened

شـــکل 11 امپـدانس کوسـتیکی سـاز نـی بـرای انگشـت‌گـذاری نـت F4. حالـت انگشت‌گذاری نت F#4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داده شده است. در این حالت تنها اولین، دومین، سومین، و چهارمین سوراخ نی باید باز باشد

اضافی (نت F6) نشان می‌دهد که در عمل شکل دهان و اضافه‌شدن حجم آن به نی می‌تواند نقشی مهم در تولید نغمه‌ها داشته باشد. این مسئله در شکل 13 که دو کمینه، و جدول 10 که سه نت دارد هم دیده می‌شود. شکل 10 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت گذاری نت F4. حالت انگشت گذاری نت F4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داده شده است. در این حالت تنها اولین، دومین، و سومین سوراخ نی باید باز باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک دستگاه بازتاب‌سنج پالس برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی لوله‌ها ساخته شد. به‌کمک این دستگاه امپدانس (پاگیری) اکوستیکی ورودی یک نی دوی دیاپازون اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌های مشابهی که برای سازهای غربی نظیر کلارینت و فلوت انجام شده است نشان می‌دهد که کمینه‌ها یا بیشینه‌های منحنی امپدانس باید با

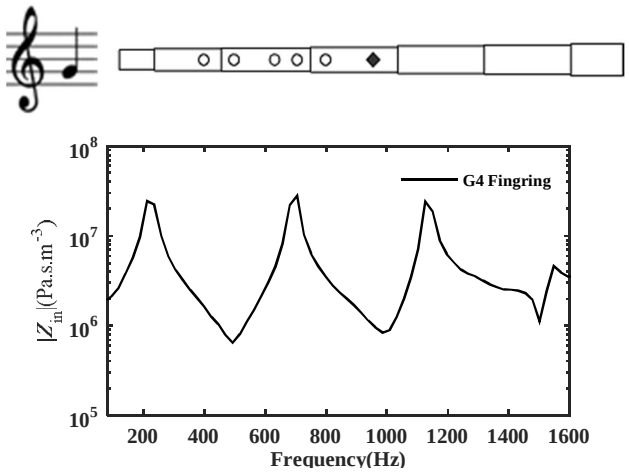

Fig. 12 Acoustic impedance of Do-ney for G4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, all tone holes except the rear one should be opened

شـــکل 12 امپـدانس کوسـتیکی سـاز نـی بـرای انگشـت گـذاری نـت G4. حالـت انگشت‌گذاری نت G4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داده شده است. در این حالت تمام سوراخ‌های ساز، مگر سوراخ پشتی، باید باز باشد

جدول 9 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل‌اجرا با انگشت‌گذاری G4

Table 9 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with G4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامد نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	G4	392	492.7	25.69
2	G5	783.99	985.3	25.68
3	D6	1174.7	1501	27.78

بسامد هماهنگ‌های نت‌های این سازها منطبق باشد. اما نتایج ما نشان داد که برای نی چنین انطباقی وجود ندارد. این عدم‌انطباق می‌تواند به نقش دهان نوازنده در تولید نغمه‌های نی مربوط باشد؛ نقشی که تجربهٔ نوازندگان نی نیز مؤید آن است. بنابراین باید نقش دهان در تولید نت‌ها در نی را نیز بررسی کرد؛ کاری که در ادامهٔ این پژوهش به آن پرداخته می‌شود.

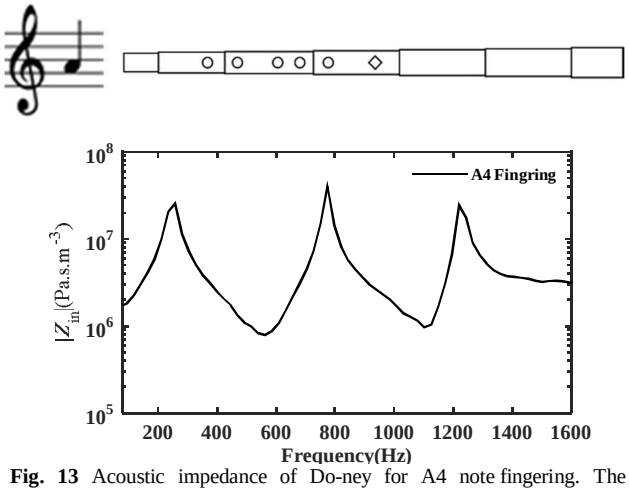

Fig. 13 Acoustic impedance of Do-ney for A4 note fingering. The fingering is indicated. In this situation, all tone holes should be opened

شکل 13 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت گـذاری نـت A4. حالـت انگشـت گذاری نت A4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشـان داد شـده اسـت. در ایـن حالت تمام سوراخ‌های روی ساز باید باز باشد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]

جدول 10 اختلاف بین بسامد کمینهٔ منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایهٔ نت‌های قابل اجرا با انگشت‌گذاری A4

Table 10 The difference between the frequency of minimum of acoustic impedance curve and fundamental frequency of playable notes with A4 fingering

شمارهٔ کمینه	نام نت‌های قابل نواختن	بسامد نت‌های قابل نواختن (Hz)	بسامد اندازه‌گیری شده (Hz)	خطا (%)
1	A4	440	563	27.95
2	A5	880	1103	25.34
3	E6	1318.5	-	-

7- مراجع

[1] P. Dickens, J. Smith, J. Wolfe, Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 121, No. 3, pp. 1471-1481, 2007.

[2] J. A. Ware, K. Aki, Continuous and discrete inverse-scattering problems in a stratified elastic medium. I. Plane waves at normal incidence, *The journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 45, No. 4, pp. 911-921, 1969.

[3] J. J. Fredberg, M. Wohl, G. M. Glass, H. L. Dorkin, Airway area by acoustic reflections measured at the mouth, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 48, No. 5, pp. 749-758, 1980.

[4] A. Benade, J. Smith, Brass wind instrument impulse response measurements, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 70, No. S1, pp. S22-S22, 1981.

[5] R. D. Ayers, L. J. Eliason, M. M. B. Salem, An acoustic pulse generator for wind instrument bores, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, No. S1, pp. S90-S90, 1985.

[6] R. D. Ayers, L. J. Eliason, A. S. Lee, Multiple reflections in simple bore shapes, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, No. S1, pp. S90-S90, 1985.

[7] A. Deane, *Time domain work on brass instruments*, PhD Thesis, University of Surrey, England, 1986.

[8] A. Watson, *Impulse measurements on tubular acoustic systems*, PhD Thesis, University of Surrey, England, 1989.

[9] D. B. Sharp, *Acoustic pulse reflectometry for the measurement of musical wind instruments*, PhD Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, 1996.

[10] M. mohabbati, Measurment the time and frequency sign of a ney tune in anechoic chamber, *Proceeding of 1th International Conference on Acoustics and Vibration*, Tehran, Iran, Dec 21-22, 2011. (in Persian فارسی)

[11] P. Dickens, R. France, J. Smith, J. Wolfe, Clarinet acoustics: introducing a compendium of impedance and sound spectra, *Acoustics Australia*, Vol. 35, No. 1, pp. 17, 2007.

[12] N. H. Fletcher, T. Rossing, *The physics of musical instruments*,2th Eddition, pp. 401-548, (Translated by A. banoushi), Tehran University of IRIB Publication Center, 1929. (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.42.3]