



اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی ورودی ساز نی به روش بازتاب‌سنجدی پالس

ادریس محمدی تلوار^۱, ایوب بنوشهی^{۲*}, محسن بروغنی^۱

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صدا، دانشگاه صدا و سیما، تهران
 ۲- استادیار، مهندسی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران
 *تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹

چکیده

بررسی تغییرات بسامدی امپدانس اکوستیکی می‌تواند نقش مهمی در شناسایی و پهنه‌سازی یک ساز داشته باشد. برای یک لوله 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 بازتاب‌سنجدی پالس ساخته شد. برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه، ابتدا امپدانس اکوستیکی ورودی یک لوله پلاستیک سه پخشی اندازه‌گیری شد و نتایج اندازه‌گیری با مقادیر محاسبه‌شده توسط فرمول‌های به خوبی شناخته شده، مقایسه شد. در محدوده بسامدهای مورد نظر عمل کرد دستگاه کاملاً 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 قلوت دیده می‌شود، بسامد کمینه‌های منحنی امپدانس منطبق بر بسامدهای نت‌های قابل نواختن نظر نیست. علت را می‌توان در نقش اساسی دهان در تولید نغمه‌های نی دانست.

اطلاعات مقاله

| |
|---------------------------------|
| مقاله پژوهشی کامل |
| دریافت: ۱۰ بهمن ۱۳۹۴ |
| پذیرش: ۱۰ فروردین ۱۳۹۵ |
| ارائه در سایت: ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۵ |
| کلید واژگان: |
| امپدانس اکوستیکی |
| بازتاب‌سنجدی پالس |
| ساز نی |
| کوک‌ساز |
| انگشت‌گذاری |

Input acoustic impedance measurement of Ney with Pulse reflectometry method

Edris Mohammady Talvar¹, Ayoub Banoushi^{2*}, Mohsen Broghany¹

۱- 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.

می‌توان محاسبه کرد، اما این محاسبه برای سازهای بادی اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است؛ از این‌رو امپدانس اکوستیکی این سازها عموماً اندازه‌گیری می‌شود.
 روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی وجود دارد، از جمله روش تک‌میکروفونه با منبع جریان حجمی، روش بازتاب‌سنجدی پالس، روش دو میکروفونی، روش منبع جریان حجمی با میکروفون بالادست، روش دو بادسنجی، روش میکروفون و بادسنج، روش چند میکروفونه [1]. از این میان، روش بازتاب‌سنجدی پالس به دلیل استفاده از یک میکروفون و یک بلندگو، عدم نیاز به کالیبراسیون، محاسبات ساده، پیاده‌سازی آسان، و دقت قابل قبول در

۱- مقدمه
 امپدانس اکوستیکی کمیتی است که در همه حوزه‌های اکوستیک کم و بیش اهمیت دارد؛ بهویژه در لوله‌ها 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 این جاست که در حالت کلی امپدانس اکوستیکی مانند امپدانس الکتریکی تابعیت بسامدی دارد. این تابعیت باعث پیچیدگی در محاسبات و اندازه‌گیری می‌شود. امپدانس اکوستیکی یک لوله ساده را

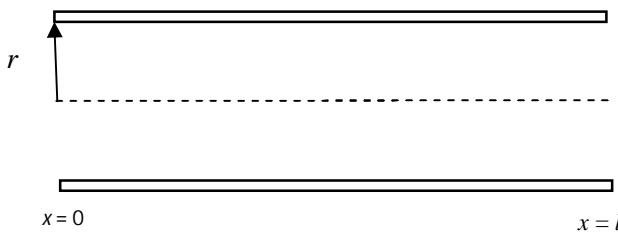


Fig. 1 A simple cylinder

شکل ۱ لوله ساده

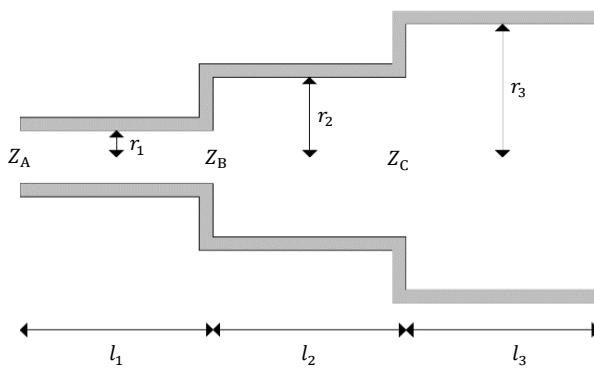


Fig. 2 Sketch of a stepped tube with two discontinuities. Each discontinuity made a reflection [9]

شکل ۲ طرحی از یک لوله پله‌دار با دو ناپیوستگی. هر ناپیوستگی بازتابی ایجاد می‌کند [9]

ثابت انتشار k' در این معادلات عبارت است از

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

که در آن، $c = 331.6\sqrt{1 + \tau/273}$ m/s سرعت صدا در هوایی با دمای τ ، η ضریب چسبندگی برشی هوای، γ نسبت گرمایشی ویژه، κ رسانایی حرارتی هوای، و c_p گرمایی ویژه هوای در فشار ثابت است.

۳- ساخت دستگاه بازتاب‌سنجه پالس اکوستیکی

محاسبات بخش ۲، در عمل برای یافتن امپدانس ورودی لوله‌هایی با دیواره‌های بهنسبت نرم و متخلخل به کار نمی‌آید. بیشتر سازه‌ها، به ویژه سازه‌هایی، 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، بازتاب‌سنجه پالس است.

۱-۳- تئوری بازتاب‌سنجه

در روش بازتاب‌سنجه پالس، دهانه لوله توسط یک پالس ضربه‌ای تحریک، و نخستین پالس بازتابیده شده به دهانه لوله اندازه‌گیری می‌شود. این پالس بازتابیده حاوی اطلاعات لازم برای استخراج امپدانس اکوستیکی ورودی لوله است، که با عملیات ریاضی ای بهنسبت ساده قابل استخراج است [9].

شکل ۳ نمودار بسته تجهیزات لازم برای این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. یک پالس سوزنی با پهنای حدود ۸۰ μs توسط یک رایانه تولید و توسط یک تقویت‌کننده به بلندگو خورانده می‌شود. (در عمل تولید یک

اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی، می‌تواند ترجیح داده شود). روش بازتاب‌سنجه پالس اکوستیکی کاربردهای گوناگونی دارد. این روش ابتدا در مطالعات زلزله‌شناسی برای بررسی لایه‌بندی پوسته زمین [2]، و سپس در پژوهشی به عنوان روشی برای اندازه‌گیری ابعاد مسیر هوایی در دهانه کار برده شد [3]. در نخستین تجربه برای اندازه‌گیری پاسخ ضربه اکوستیکی یک ساز بادی به روش بازتاب‌سنجه پالس از منبع تخلیه هاله‌ای به عنوان منبع تحریک استفاده شد [4]. سپس یک تراگذار پیزاولکتریک جایگزین این منبع شد [6,5]. نخستین تجربه استفاده از بلندگو به عنوان 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 توسیط‌گیری از پالس‌های تولیدشده و بازتاب‌های آن از لوله تحت‌سنجه را فراهم می‌کند. این توسیط‌گیری به منظور بهبود نسبت سیگنال به نویز صورت می‌گیرد.

استفاده از روش بازتاب‌سنجه پالس برای ترسیم منحنی‌های امپدانس اکوستیکی ورودی چند ساز بادی را واتسن در سال ۱۹۸۹ گزارش کرد [8]. مشکل استفاده از روش بازتاب‌سنجه پالس اکوستیکی برای اندازه‌گیری امپدانس سازه‌ای بادی، محدودیت آن در اندازه‌گیری سازه‌ای با بوری 1 دراز است؛ هر چند روشی برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی سازه‌ای با طول بیشتر از ۱ متر هم ارائه شده است [9]. در این روش، با استفاده از الگوریتم‌های کنترل فعلی نویز^۲ امکان اندازه‌گیری امپدانس سازه‌ای با درازای تا حدود ۴ متر فراهم می‌شود.

در این مقاله، نتایج اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی ساز نی به روش بازتاب‌سنجه پالس ارائه می‌شود. به این منظور، ابتدا در بخش ۲، تئوری محاسبه امپدانس اکوستیکی یک لوله مرور می‌شود؛ در بخش ۳، تجهیزات طراحی و ساخته شده برای انجام آزمایش، و در بخش ۴، ساز نی و بعضی مشخصه‌های آن معرفی می‌شود؛ در بخش ۵ نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده ارائه می‌شود؛ و بالاخره، در بخش ۶ نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها خلاصه می‌شود.

۲- محاسبه امپدانس اکوستیکی لوله‌ها

در یک لوله ساده مانند آن‌چه در شکل ۱ نشان داده شده، امپدانس اکوستیکی ورودی (Z_{in}) به صورت معادله (1) محاسبه می‌شود [9]:

$$Z_{in} = \frac{\rho\omega}{k'\pi r^2} \left(\frac{0.25k'^2r^2 + j(0.6k'r + \tan k'l)}{(1 - 0.6k'r \tan k'l) + j0.25k'^2r^2 \tan k'l} \right) \quad (1)$$

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

برای یک لوله پله‌دار، مانند آن‌چه در شکل ۲ نشان داده شده، امپدانس ورودی کمی پیچیده‌تر است و به صورت معادله‌های (2-4) بدست می‌آید.

$$Z_C = \frac{\rho\omega}{k'\pi r_3^2} \left(\frac{0.25k'^2r_3^2 + j(0.6k'r_3 + \tan k'l_3)}{(1 - 0.6k'r_3 \tan k'l_3) + j0.25k'^2r_3^2 \tan k'l_3} \right) \quad (2)$$

$$Z_B = \frac{\rho\omega}{k'\pi r_2^2} \left(\frac{\frac{Z_C k' \pi r_2}{\rho \omega} + j \tan k'l_2}{1 + j \frac{Z_C k' \pi r_2^2}{\rho \omega} \tan k'l_2} \right) \quad (3)$$

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

^۱ لوله اصلی ساز که در زبان انگلیسی Bore گفته می‌شود.

^۲ Active Noise control



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 ساخته شده برای اندازه‌گیری امپدانس ورودی ساز نی. ساز نی تحت سنجش در انتهای لوله منبع دیده می‌شود

فاصله بلندگو تا میکروفون $L_1 = 3.37\text{m}$ و فاصله میکروفون تا انتهای لوله منبع $L_2 = 3.35\text{m}$ است. حلقه‌ای کردن لوله منبع برای کاهش فضای اشغال شده و استفاده آسان‌تر از تجهیزات است. تجهیزات استفاده شده در بازتاب‌سنج ساخته شده عبارت است از: بلندگو 8 اهمی به شماره سریال Beyerdynamic MCE 5 (C065FT002)، میکروفون ALTEC 5110 DELL، و آمپلی‌فایر 1593B.

4- نی، ساز چوینن‌بادی ایرانی

نی کی از قدیمی‌ترین سازهای چوینن‌بادی ایرانی است. نی ساقه‌ای از گیاه نی است که از شش جا سوراخ (سوراخ‌پرده) می‌شود. به طور معمول قطر هر سوراخ‌پرده با قطر داخلی لوله اصلی ساز مسلوی است. نوازنده با انگشت‌گذاری روی سوراخ‌پرده‌ها طول مؤثر لوله، و از این راه نغمهٔ نواخته شده را کنترل می‌کند. شکل 5 یک نمونه نی با کوک دوی دیپاپازون را نشان می‌دهد. ساز نی [10] برخلاف برخی از سازهای بادی دیگر فاقد قمیش یا قطعهٔ دهانی است، ساز از طریق زبان، لبه، دندان‌های پیشین، و یک تکه لوله کوتاه در دهانهٔ نی تحریک می‌شود. لوله کوتاه دهانهٔ نی از مس یا طلق پلاستیکی است. ساز نی از نظر نوازنده‌گی یعنی شیوهٔ تحریک شبیه به ساز فلوت است، چون در هردوی آن‌ها از تدباد (air jet) برای تحریک ساز استفاده می‌شود.

5- نتایج

5-1- صحه‌گذاری عملکرد بازتاب‌سنج ساخته شده

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

سیگنال ضربه، آن‌طور که در ثئوری دلتای دیراک گفته می‌شود، غیرممکن است) پالس صوتی تولیدشده توسط بلندگو به یک لوله واسطه به نام لوله منبع وارد می‌شود. لوله تحت سنجش به سر دیگر لوله منبع متصل می‌شود. جایی به فاصله L_1 از بلندگو و به فاصله L_2 از ورودی لوله منبع سنجش میکروفونی بر دیواره لوله منبع تعییه می‌شود. این میکروفون وظیفهٔ برچیدن موج صدای بازتابی را بر عهده دارد. مقادیر L_1 و L_2 بسیار مهم هستند و باید به گونه‌ای انتخاب شوند که تفکیک نخستین پالس بازتابی از پالس ورودی و سایر بازتاب‌ها ممکن شود.

باید توجه داشت که پالس بازتابی در عمل مسیر L_2 را نیز طی می‌کند و سپس به میکروفون می‌رسد. با توجه به این که هدف اندازه‌گیری امپدانس ورودی جسم تحت سنجش است، باید اثر بخش L_2 حذف شود. به این منظور، اندازه‌گیری باید در دو حالت انجام شود، یکی هنگام اتصال جسم آزمون و دیگری وقتی که انتهای لوله منبع بسته می‌شود. با دی‌کانولوکردن خروجی میکروفون در هردوی این حالت‌ها، اثر L_2 حذف می‌شود و پاسخ ضربه ورودی جسم به‌شكل معادله (6) به دست می‌آید [9].

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

در رابطه (6)، $IIR[e^{j\theta}]$ پاسخ ضربه ورودی جسم تحت سنجش است. $R[e^{j\theta}]$ نخستین بازتاب در حالت لوله منبع بسته، $I[e^{j\theta}]$ نخستین بازتاب در حالت اتصال جسم تحت سنجش، و $[e^{j\theta}]I^*[e^{j\theta}]$ مزدوج مختلط آن در حوزهٔ بسامد است. q عدد بسیار کوچکی است که از صفرشدن مخرج جلوگیری می‌کند.

پاسخ ضربه‌ای که به‌شكل رابطه (6) به دست می‌آید حاوی اطلاعات مفیدی در مورد ساختار جسم تحت سنجش 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. رابطه (7) ارتباط امپدانس اکوستیکی ($Z_{in}[e^{j\theta}]$) با پاسخ ضربه اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

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

که در آن $P_{0,r}[e^{j\theta}]$ فشار صدای ورودی، $U_{0,r}[e^{j\theta}]$ سرعت حجمی ورودی، Z_0 امپدانس مشخصه لوله منبع، و $[e^{j\theta}]IIR[e^{j\theta}]$ پاسخ ضربه اندازه‌گیری شده است.

3- بازتاب سنج ساخته شده

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

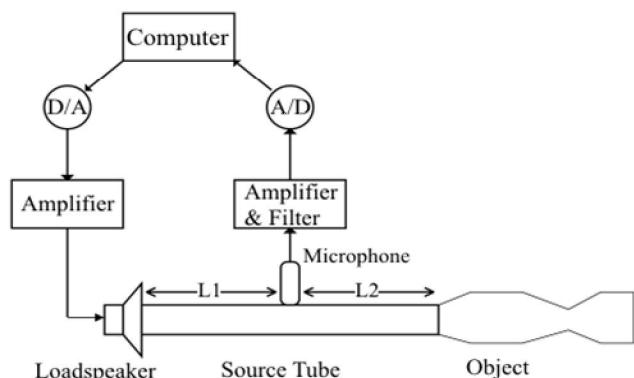


Fig. 3 Close Schema of a pulse reflectometer which used in practical [9]

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

جدول 2 مقدار انحراف بسامدهای نظیر به کمینه‌های منحنی امپدانس اندازه‌گیری شده از مشابه محاسبه شده آن‌ها

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

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

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

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

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

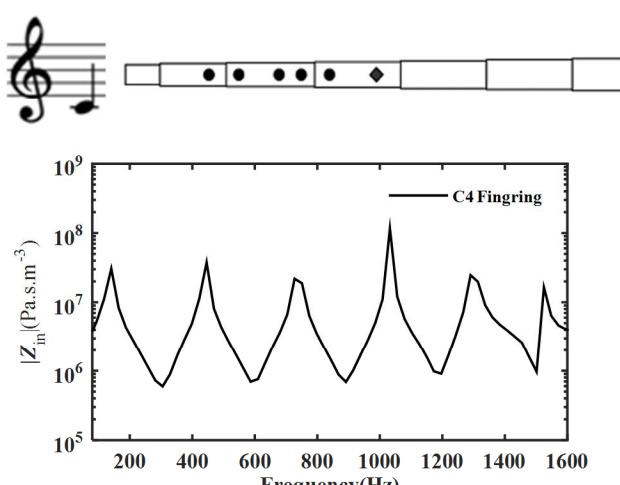


Fig. 7 Acoustic impedance of a Do-ney for C4 note fingering. The fingering of C4 note has been indicated. In this situation, all tone holes should be stopped

شکل 7 امپدانس اکوستیکی 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 همه سوراخ‌های نی بسته می‌شود. سوراخ لوزی شکل سوراخ پشتی نی است. با توجه به رابطه 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, به دلیل مسدود شدن یک طرف ساز بادی با دهان و قمیش, تشدیدهای همانگ این ساز بادی در نقاط بیشینه منحنی امپدانس ظاهر می‌شود [12,11]. اما در سازی مانند فلوت, چون بوری ساز از طریق تندیاب تحریک می‌شود و نقطه تحریک به هوا راه دارد, تشدیدها در نقاط کمینه ظاهر می‌شود [12,11].

حساسیت بازتاب‌سنج را به نویز محیط افزایش می‌دهد. به همین علت تمام آزمایش‌ها در استودیو دانشگاه صدا و سیما انجام شد. برای افزایش اثری اسیگنال تزریقی به سیستم, و اطمینان از صحت عملکرد دستگاه (شامل بلندگو, میکروفون, کارت صدا) از محیط استودیویی استفاده شد و هر آزمایش 64 بار تکرار شد. میکروفون و بلندگو استفاده شده کالبیره نشده‌اند، اما تکرار آزمایش‌ها ثابت کرد که در محدوده بسامدی مورد نظر یعنی حدود 250Hz تا 1600Hz بلندگو, میکروفون، 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 محاسبه شده 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 دیایازون. این ساز از هفت بند و شش سوراخ پرده تشکیل شده است. سوراخ پرده ششم در پشت بند چهارم قرار گرفته، و با یک دایره جای آن روی شکل مشخص شده است

جدول 1 مشخصات لوله 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

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

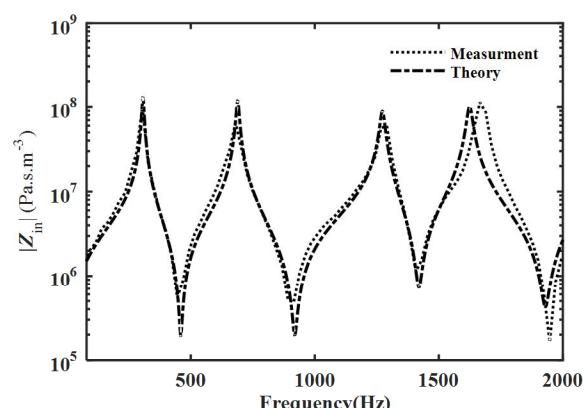


Fig. 6 Comparison of measured and calculated acoustic impedance curves of a stepped tube. The physical characteristics of tube have been listed in table 1

شکل 6 مقایسه منحنی‌های امپدانس اکوستیکی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

یک لوله پلهدار. مشخصات لوله در جدول 1 فهرست شده است

به ترتیب، 8 تا 12 را در مقایسه با بسامدپایه نت‌های قابل اجرا در انگشت‌گذاری‌های مربوطه نشان می‌دهد.

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

جدول 6 اختلاف بین بسامد کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایه نت‌های قابل اجرا 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

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

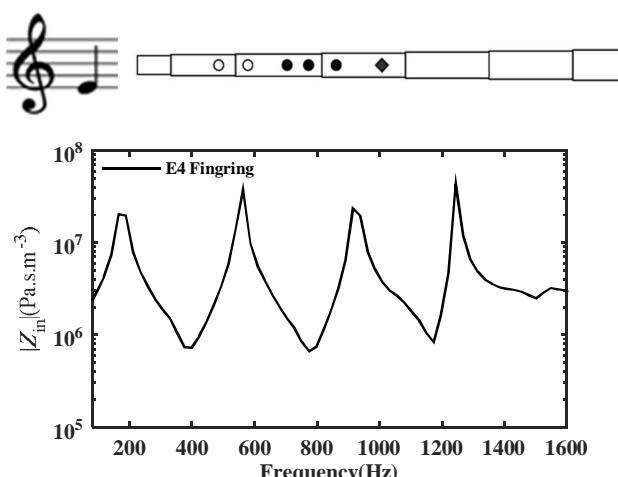


Fig. 9 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت‌گذاری نت E4. حالت انگشت‌گذاری نت E4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داد شده است. در این حالت تنها اولین و دومین سوراخ نی باید باز باشد

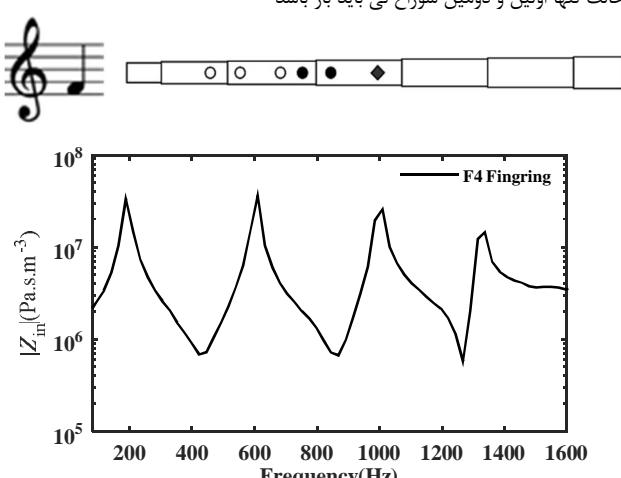


Fig. 10 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت‌گذاری نت F4. حالت انگشت‌گذاری نت F4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داد شده است

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

در ساز نی نیز بهمانند فلوت تندیاد عامل تحریک ساز است و نی مانند یک لوله دو سر باز عمل می‌کند. بنابراین بسامدهای تشید آن بر روی کمینه‌های منحنی امپدانس اکوستیکی می‌افتد. جدول 4 مقدار بسامدهای کمینه چهار تشید اول شکل 7 را در مقایسه با بسامدپایه نت‌های قابل اجرا در این انگشت‌گذاری نشان می‌دهد.

شکل های 8 تا 12 امپدانس اکوستیکی اندازه‌گیری شده برای ساز نی را در انگشت‌گذاری‌های نظری، به ترتیب، نت E4، نت F4، نت G4، و نت A4 را نشان می‌دهند. نحوه انگشت‌گذاری برای این نت‌ها نیز در بالای شکل‌ها دیده می‌شود.

جدول‌های 5 تا 9 مقدار بسامدهای کمینه چهار تشید اول شکل‌های،

جدول 4 اختلاف بین بسامد کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایه نت‌های قابل اجرا 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

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

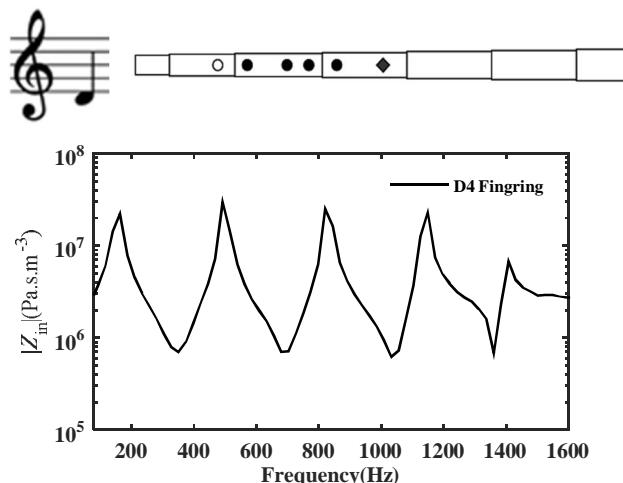


Fig. 8 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت‌گذاری نت D4. حالت انگشت‌گذاری نت D4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داد شده است

شکل 8 امپدانس کوستیکی ساز نی برای انگشت‌گذاری نت D4. حالت انگشت‌گذاری 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 کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامدپایه نت‌های قابل اجرا 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

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

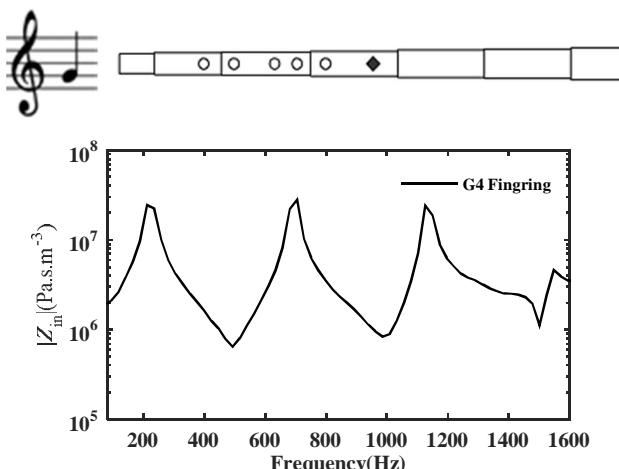


Fig. 12 Acoustic impedance of Do-ney for G4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, all tone holes except the rear one should be opened

شکل 12 امپدانس اکوستیکی ساز نی برای انگشت گذاری نت G4. حالت انگشت گذاری 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 کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامد پایه نت‌های قابل اجرا با انگشت گذاری G4

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

| خطا (%) | بسامد اندازه‌گیری شده (Hz) | بسامد نت‌های قابل نواختن (Hz) | بسامد نت‌های قابل نواختن (Hz) | نام نت‌های قابل نواختن | شماره کمینه |
|---------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|
| 25.69 | 492.7 | 392 | 422.3 | G4 | 1 |
| 25.68 | 985.3 | 783.99 | 868 | G5 | 2 |
| 27.78 | 1501 | 1174.7 | 1267 | D6 | 3 |

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

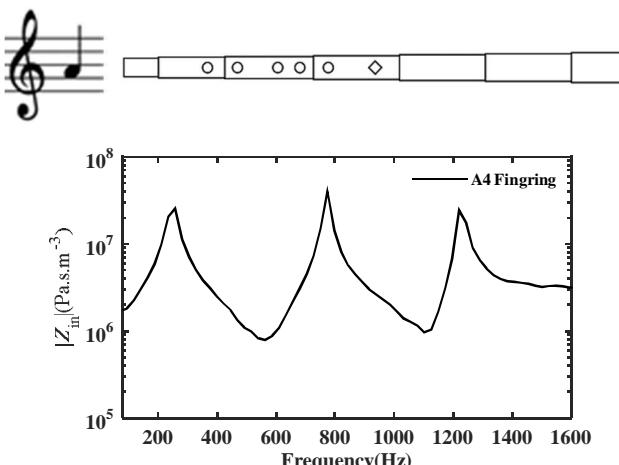


Fig. 13 Acoustic impedance of Do-ney for A4 note fingering. The fingering is indicated. In this situation, all tone holes should be opened

شکل 13 امپدانس اکوستیکی ساز نی برای انگشت گذاری نت A4. حالت انگشت گذاری نت A4 در بالای منحنی امپدانس اکوستیکی نشان داده شده است. در این حالت تمام سوراخ‌های روی ساز باید باز باشد

جدول 7 اختلاف بین بسامد کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامد پایه نت‌های قابل اجرا با انگشت گذاری F4

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

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

جدول 8 اختلاف بین بسامد کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامد پایه نت‌های قابل اجرا با انگشت گذاری 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

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

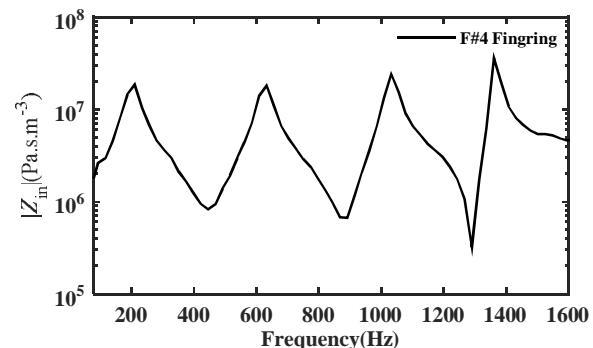
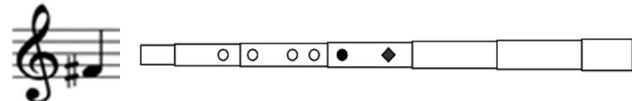


Fig. 11 Acoustic impedance of Do-ney for F#4 note fingering. The fingering has been indicated. In this situation, only the first, second, third, and fourth tone holes should be opened

شکل 11 امپدانس اکوستیکی 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، سومین، و چهارمین سوراخ نی باید باز باشد

اضافی (نت F6) نشان می‌دهد که در عمل شکل دهان و اضافه شدن 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 اکوستیکی 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 بازتاب‌سنجه پالس برای اندازه‌گیری امپدانس اکوستیکی لوله‌ها ساخته شد. بدینکه 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

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 Edition, pp. 401-548, (Translated by A. banoushi), Tehran University of IRIB Publication Center, 1929. (in Persian) (فارسی)

جدول 10 اختلاف بین بسامد کمینه منحنی امپدانس اکوستیکی و بسامد پایه 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

| شماره | نام نت‌های | بسامد نت‌های قابل | بسامد اندازه‌گیری | خطا (%) |
|-------|-------------|-------------------|-------------------|---------|
| کمینه | قابل نواختن | نوایختن (Hz) | شدہ (Hz) | |
| A4 | 440 | 563 | 27.95 | |
| A5 | 880 | 1103 | 25.34 | |
| E6 | 1318.5 | - | - | 1318.5 |
| | | | | 3 |

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