



بررسی تحلیلی و تجربی پاسخ فرکانسی سیستم میکروفن از راه دور جهت تخمین نوسانات فشار سطحی

عباس افشاری¹، علی اکبر دهقان^{2*}، ولی کلانتار³، محمد فرمانی⁴

1 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

4 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی 89195-741، adehghan@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 تیر 1395

پذیرش: 28 شهریور 1395

ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:

سیستم میکروفن از راه دور

حل تحلیلی انتشار صدا

پاسخ دینامیکی

نوسانات فشار ناپایا

کالیبراسیون تجربی

چکیده

اندازه‌گیری دقیق نوسانات فشار ناپایا روی سطح نیازمند روش‌های تجربی است که از نظر مکانی دارای تراکم زیادی بوده و محدوده فرکانسی بالایی را در برگیرد. بدین منظور در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای روی روش میکروفن از راه دور انجام گرفته است. در این روش به جای نصب مستقیم سنسور فشار روی سطح، سنسور در دوردست نصب و از طریق چند لوله متوالی با سطح ارتباط می‌یابد. نوسانات فشار روی سطح در داخل لوله‌ها به‌صورت امواج صوتی حرکت کرده و در هنگام عبور از روی سنسور فشار که به صورت عمود بر لوله نصب شده، اندازه‌گیری می‌شوند. در مطالعه حاضر به‌منظور مدل‌سازی تحلیلی سیستم میکروفن از راه دور و بررسی اثر پارامترهای مختلف هندسی سیستم روی پاسخ دینامیکی آن، از حل تحلیلی انتشار امواج صدا داخل لوله‌های صلب استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی صحت نتایج مدل‌سازی، پاسخ دینامیکی یک سیستم میکروفن از راه دور نمونه از طریق کالیبراسیون تجربی بدست آمده است. مقایسه نتایج حل تحلیلی با نتایج حاصل از کالیبراسیون تجربی نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل تحلیلی است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر قطر لوله‌های سیستم میکروفن از راه دور می‌تواند منجر به رخ دادن پدیده تشدید و ایجاد هارمونیک‌هایی در دو ناحیه فرکانسی شود. دامنه هارمونیک‌های فرکانس پایین وابسته به طول لوله استهلاک بوده و با افزایش آن کاهش می‌یابد. همچنین دامنه و فرکانس هارمونیک‌های فرکانس بالا وابسته به طول لوله اول بوده و با افزایش آن کاهش می‌یابند. به‌علاوه افزایش طول لوله اول و دوم باعث افزایش تأخیر فاز پاسخ دینامیکی سیستم خواهد شد.

Analytical and experimental investigation of remote microphone system response for prediction of surface pressure fluctuations

Abbas Afshari, Ali Akbar Dehghan*, Vali Kalantar, Mohammad Farmani

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, adehghan@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 03 July 2016

Accepted 18 September 2016

Available Online 09 October 2016

Keywords:

Remote microphone system

Analytical solution of sound propagation

Dynamic response

Unsteady pressure fluctuations

Experimental calibration

ABSTRACT

Accurate measurement of unsteady pressure fluctuations along a surface requires experimental set up with high spacing resolution and high frequency domain. Therefore, in recent decades extensive studies have been conducted on remote microphone approach. In this method, instead of using flash mounted sensors, they were installed remotely and connected to the model surface through one or several continuously connected tubes. Surface pressure fluctuations travel within the tubing in the form of sound waves and they are measured when passing over the remote pressure sensor, mounted perpendicular to the tubing. In the present study, an analytical solution of sound waves propagation inside the rigid tubes is used for modelling of the remote microphone system and to investigate the effects of its parameters on dynamic response. In order to verify the accuracy of proposed modeling, the dynamic response of a typical remote microphone has been obtained through experimental calibration. Comparing the analytical and experimental results indicates high accuracy of the analytical modeling. Results show that changes in tubing diameter lead to occurrence of resonance and creating harmonics in two frequency regions. The amplitude of low-frequency harmonics depends on the length of the damping duct and decreases with increasing of its length. Instead, the amplitude and frequency of high-frequency harmonics depend on the length of the first tube and they decrease with the increase of first tube length. Also, increase of the first and second tube lengths leads to an increase in phase of dynamic response of the remote microphone system.

1- مقدمه

Please cite this article using:

A. Afshari, A. A. Dehghan, V. Kalantar, M. Farmani, Analytical and experimental investigation of remote microphone system response for prediction of surface pressure fluctuations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 155-162, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استهلاک¹ حرکت کرده و به واسطه ویسکوزیته مستهلک می‌گردند. حضور این لوله طولانی مانع از انعکاس و بازگشت امواج صوتی به میکروفن و در نتیجه پدیده تشدید می‌شود. چنانچه طول لوله مذکور به اندازه کافی بزرگ بوده و تغییر قطر در هیچ‌کدام از لوله‌ها نداشته باشیم، مشروط بر نداشتن گرادیان دمای زیاد در طول لوله، هیچ‌گونه تشدید در سیستم میکروفن از راه دور رخ نخواهد داد. البته در بیشتر کاربردهای عملی، جهت نصب میکروفن به صورت عمودی روی لوله، نیاز به افزایش قطر لوله در محل میکروفن بوده که منجر به تشدید و در نتیجه تقویت برخی از فرکانس‌ها خواهد شد. از طرفی علاوه بر پدیده تشدید، تضعیف لزجی² منجر به تغییر دامنه نوسانات ناپایای فشار قبل از رسیدن به میکروفن می‌گردد. جهت تصحیح خطای ناشی از پدیده تشدید و تضعیف لزجی باید پاسخ دینامیکی سیستم به درستی تعیین شود [7]. برای این کار از هر دو روش تحلیلی و تجربی استفاده می‌گردد. روش‌های تحلیلی بیشتر در مرحله طراحی یک سیستم میکروفن از راه دور و رسیدن به پاسخ دینامیکی مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال در عمل به خاطر مشکلات ساخت مانند وجود تغییرات جزئی در قطر داخلی لوله‌ها مخصوصاً در محل اتصالات، زدگی‌ها، عدم تقارن لوله‌ها و غیره، نمودار پاسخ دینامیکی سیستم در دو حالت تحلیلی و تجربی به‌صورت کامل بر هم منطبق نخواهند بود. بنابراین نیاز به تعیین پاسخ دینامیکی دقیق سیستم از طریق روش کالیبراسیون تجربی است. به‌دست آوردن نتایج خوب از روش سیستم میکروفن از راه دور به شدت وابسته به تعیین دقیق پاسخ دینامیکی و طراحی مناسب پارامترهای مختلف سیستم است.

لازم به ذکر است که در روش میکروفن از راه دور، ایزوله بودن میکروفن از محیط بواسطه حضور لوله، باعث عدم تداخل مستقیم نویز زمینه تونل باد و در نتیجه ایجاد وابستگی بالایی بین نوسانات فشار هیدرودینامیکی سیال روی سطح مدل و سیگنال فشار اندازه‌گیری شده توسط میکروفن دور دست شده است.

چنان‌چه ذکر شد در طول سال‌های گذشته در تحقیقات مختلف از این روش جهت اندازه‌گیری نوسانات فشار ناپایای سطح استفاده شده است. با این وجود جزئیات تاثیر پارامترهای مختلف سیستم میکروفن از راه دور روی پاسخ دینامیکی سیستم کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر به منظور تعیین تحلیلی پاسخ دینامیکی سیستم میکروفن از راه دور و بررسی اثر پارامترهای مختلف هندسی سیستم روی پاسخ دینامیکی آن از حل تحلیلی انتشار امواج صدا داخل لوله‌های صلب استفاده شده است. در ادامه به منظور بررسی صحت نتایج مدل‌سازی انجام گرفته، پاسخ دینامیکی یک سیستم میکروفن از راه دور نمونه از طریق کالیبراسیون تجربی به‌دست آمده است. مقایسه نتایج حل تحلیلی با نتایج حاصل از کالیبراسیون تجربی نشان‌دهنده کارایی بالای مدل‌سازی تحلیلی انجام گرفته است. لازم به‌ذکر است که طراحی و ساخت تجهیزات مربوط به کالیبراسیون تجربی سیستم میکروفن از راه دور شامل کالیبراتور میکروفن، منبع تغذیه میکروفن، سیستم میکروفن از راه دور، کدهای داده برداری و آنالیز داده‌ها برای اولین بار در کشور انجام گرفته است.

2- حل تحلیلی انتشار امواج صدا در لوله‌های صلب

در طول دهه‌های گذشته، انتشار صدا در لوله‌های صلب توسط محققین

ظهور و توسعه روزافزون علم آیرودینامیک در دهه‌های اخیر منجر به ایجاد تجهیزات مدرن آکوستیکی به ویژه تونل‌های باد آیرودینامیکی در نقاط مختلف جهان شده است. با این وجود، هزینه‌های بالای ساخت چنین تونل‌هایی و مشکلات خاص آن‌ها در اندازه‌گیری‌های آیرودینامیکی، در عمل استفاده از این نوع تونل‌های باد را محدود نموده است. در عوض در بسیاری از موارد می‌توان به جای اندازه‌گیری میدان صدا در دور دست که نیازمند تونل آیرودینامیکی است، به مطالعه رفتار منبع نویز یعنی نوسانات فشار ناپایای سطح در یک تونل باد معمولی پرداخت. البته لازم به ذکر است که در هنگام اندازه‌گیری نوسانات فشار سطح یک مدل در تونل باد، آنچه میکروفن و یا هر سنسور اندازه‌گیری فشار ناپایا اندازه می‌گیرد، نوسانات فشار هیدرودینامیکی سیال روی مدل به اضافه نوسانات فشار ایجاد شده توسط خود تونل باد (نویز زمینه تونل باد) می‌باشد. با این وجود، در اغلب موارد به دلیل بالا بودن سطح نوسانات فشار هیدرودینامیکی سیال روی سطح مدل نسبت به نویز زمینه تونل باد، امکان اندازه‌گیری نوسانات فشار سطح حتی در تونل‌های آیرودینامیکی وجود دارد.

اندازه‌گیری دقیق نوسانات فشار ناپایای سطح، نیازمند ایجاد روش‌هایی است که از نظر مکانی دارای تراکم زیادی بوده و محدوده فرکانسی بالایی را در برگیرد. برای تعیین میدان فشار ناپایای سطح، روش‌های تجربی مختلفی از جمله نصب مستقیم سنسور فشار روی سطح، نصب غشاء روی سطح و استفاده از لیزر، استفاده از رنگ حساس به فشار و غیره وجود دارد. هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. متداول‌ترین راه اندازه‌گیری نوسانات فشار، اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها با استفاده از سنسورهایی است که به‌صورت همسطح با مدل نصب شده‌اند. برخی از محدودیت‌های اصلی این روش عبارتند از: محدود بودن حداقل فاصله بین دو سنسور به ابعاد سنسور، عدم توانایی نصب سنسور روی سطوح انحنا دار و نازک مثل لبه فرار ایرفویل و محدودیت استفاده در دماهای بالا، لرزش‌های شدید و محیط‌های شیمیایی.

ساده‌ترین روش برای حذف محدودیت‌های یاد شده استفاده از یک لوله واسطه بین نقطه اندازه‌گیری فشار روی سطح (در یک طرف) و سنسور فشار (در طرف دیگر لوله) است. این روش به صورت تحلیلی و تجربی توسط محققین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است [2,1]. نتایج آن‌ها کارایی روش مذکور را تنها برای طول لوله بسیار کوچک و فرکانس‌های پایین تأیید نمود. چرا که امواج فشاری منتشر شده در طول لوله با امواج منعکس شده از سطح سنسور تداخل نموده و باعث ایجاد انحراف زیادی در پاسخ دینامیکی سیستم مخصوصاً در فرکانس‌های بالا می‌گردد. برای حل مشکل انعکاس امواج از سطح سنسور، سیستم میکروفن از راه دور پیشنهاد شد. یکی از اولین سیستم‌های میکروفن از راه دور توسط اینگولند و ریچارد در سال 1985 توسعه داده شد [3]. چندین سال بعد پیرنس و راجر جهت اندازه‌گیری نوسانات فشار یک بال دوبعدی از این روش استفاده نمودند [4]. کارایی بالای این روش طی سال‌های اخیر در مطالعات مختلف مورد تأیید قرار گرفته است [5,6].

نحوه عملکرد سیستم میکروفن از راه دور بدین صورت است که نوسانات فشار ناپایا در داخل لوله به صورت امواج صوتی حرکت کرده و در هنگام عبور از میکروفونی که به‌صورت عمود بر لوله نصب شده است، اندازه‌گیری می‌شوند. امواج صوتی بعد از عبور از میکروفن در یک لوله نسبتاً طویل به نام لوله

¹ Damping duct

² Viscous attenuation

استوانه‌ای $v = 0$ بوده و u ، p و T دارای اندازه محدود هستند.

- در دیواره لوله، $\eta = 1$: به خاطر شرط عدم لغزش $u = 0$ و $v = 0$ و به علت نسبت بالای هدایت حرارتی دیواره به سیال $T = 0$ (دیواره‌های هم دم).

با حل مجموعه معادلات فوق، نوسانات فشار ناپایا می‌تواند به فرم زیر نوشته شود [11].

(3) $p = (Ae^{\Gamma\xi} + Be^{-\Gamma\xi})e^{i\omega t}$
 که A و B ثابت‌های مختلط بوده و با توجه به شرایط مرزی در دو سر لوله به دست می‌آید، همچنین Γ ثابت انتشار بوده و با استفاده از رابطه زیر به دست خواهد آمد [11].

$$\Gamma = \sqrt{\frac{J_0(i^{3/2}s)}{J_2(i^{3/2}s)}} \sqrt{\frac{\gamma}{n}} \quad (4)$$

$$n = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{J_2(i^{3/2}\sigma s)}{J_0(i^{3/2}\sigma s)} \right]^{-1}$$

حل تحلیلی تیجیدیم [11] تنها قادر به مدل‌سازی رفتار انتشار صدا در یک لوله با قطر ثابت است. این در حالی است که برای مدل‌سازی یک سیستم میکروفن از راه دور، افزایش قطر در محل نصب میکروفن الزامی است. در مطالعه حاضر برای حل این مشکل از فرمول بازگشتی برگ و تیجیدیم [12] برای تعیین پاسخ دینامیکی مجموعه N لوله متصل به هم استفاده شده است. حل آن‌ها بر پایه پایستاری جرم در خروجی یک لوله و ورودی لوله بعدی است. برای یک سیستم N لوله‌ای، نسبت نوسانات فشار در ابتدا و انتهای لوله زام با طول کاهش یافته l_j و شعاع R_j عبارتست از [12]:

$$\frac{p_j}{p_{j-1}} = \left[\cosh(\Gamma_j l_j) + \frac{R_{j+1}^2 \Gamma_{j+1}}{R_j^2 \Gamma_j} \frac{J_0(i^{3/2}s_j)}{J_0(i^{3/2}s_{j+1})} \frac{J_2(i^{3/2}s_{j+1})}{J_2(i^{3/2}s_j)} \right]^{-1}$$

$$\frac{\sinh(\Gamma_j l_j)}{\sinh(\Gamma_{j+1} l_{j+1})} \left\{ \cosh(\Gamma_{j+1} l_{j+1}) - \frac{p_{j+1}}{p_j} \right\}^{-1}$$

$$j = [N, N-1, \dots, 2, 1] \quad \text{and} \quad l_j = \omega L_j / c_0 \quad (5)$$

اگر $j = N$ باشد، با صرف‌نظر از ترم‌های $j+1$ رابطه به صورت زیر خواهد شد [12].

$$\frac{p_N}{p_{N-1}} = [\cosh(\Gamma_N l_N)]^{-1} \quad (6)$$

با داشتن نسبت فشار دو سر تمام لوله‌های متصل به هم و رابطه زیر می‌توان نسبت فشار بین هر دو نقطه m و n از سیستم N لوله‌ای را به دست آورد [12].

$$\frac{p_n}{p_m} = \prod_{i=m}^{n-1} \frac{p_{i+1}}{p_i} \quad 0 \leq m < N, \quad m < n \leq N \quad (7)$$

3- مدل‌سازی تحلیلی تابع انتقال سیستم میکروفن از راه دور

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد وجود پدیده‌های تشدید و تضعیف لزجی باعث ایجاد اختلاف دامنه و فاز نوسانات ناپایای فشار بین نقطه مرجع واقع در سطح و نقطه اندازه‌گیری نوسانات فشار در محل میکروفن دوردست می‌گردد. برای محاسبه این اختلاف می‌توان از روش تابع انتقال استفاده نمود. در این روش نوسانات فشار میکروفن مرجع، $p_0(t)$ ، به‌وسیله تابع انتقال، $t_{0,m}(t)$ ، با نوسانات فشار میکروفن دوردست، $p_m(t)$ ، از طریق رابطه زیر ارتباط می‌یابد.

$$p_m(t) = t_{0,m}(t)p_0(t) \quad (8)$$

مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. کیروچف یک مجموعه معادلات غیرجبری پیچیده معروف به "حل کامل کیروچف" برای رفتار صدا در لوله‌های صلب ارائه داد [8]. او همچنین با فرض کوچک بودن طول موج نوسانات فشار نسبت به شعاع لوله، یک حل تقریبی برای لوله‌های قطور ارائه نمود. سپس، ریلی با استفاده از حل کامل کیروچف و با فرض کوچک بودن شعاع لوله نسبت به طول موج یک حل تقریبی برای لوله‌های نازک به دست آورد [9]. در ادامه زویکر و کاستن بدون در نظر گرفتن هیچ فرض محدود کننده‌ای، یک حل تحلیلی معروف به "حل فرکانس کاهش یافته پایین" برای انتشار امواج صدا در لوله‌های صلب ارائه نمودند [10]. بعد از آن‌ها، تیجیدیم [11] با بررسی پارامترهای اصلی انتشار امواج صدا در لوله‌های صلب، نشان داد که رفتار حرکت سینوسی با دامنه کوچک یک ستون سیال در یک سیلندر صلب وابسته به پارامترهای زیر است.

$$s = R\sqrt{\rho\omega/\mu}, \quad k = \omega R/c_0$$

$$\sigma = \sqrt{\mu C_p/\lambda}, \quad \gamma = C_p/C_v \quad (1)$$

که s عدد موج برشی، k فرکانس کاهش یافته، σ ریشه دوم عدد پرانتل و γ نسبت گرمای ویژه سیال است. او همچنین به صورت استقرایی اثبات نمود که حل فرکانس کاهش یافته پایین زویکر تا زمانی که $k \ll 1$ و $k/s \ll 1$ باشد اعتبار دارد. وی برای ساده‌سازی معادلات جریان از فرضیات زیر استفاده کرد [11].

- سیال همگن باشد به طوری که طول موج و شعاع لوله خیلی بزرگتر از مسافت آزاد میانگین باشد. برای هوا در شرایط استاندارد، به ازای $f < 10^8$ Hz و $R > 10^{-7}$ m این شرط برقرار است.
- جریان ناپایا
- اغتشاشات سینوسی با دامنه کوچک (بدون گردش و توربولانس)
- لوله به اندازه کافی طویل باشد به طوری که اثرات انتهای لوله قابل صرف نظر باشد.
- هدایت حرارتی دیواره خیلی بیشتر از سیال باشد.

با در نظر گرفتن فرضیات فوق، معادلات اساسی جریان شامل معادلات ناویر-استوکس در راستای محوری و شعاعی (به ترتیب ξ و η)، معادله پیوستگی، معادله حالت و معادله انرژی به صورت زیر خواهد شد [11]. فرم اولیه این معادلات و نحوه به دست آمدن آن‌ها در پیوست آمده است.

$$iu = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{1}{s^2} \left[\left(k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{3} k \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{v}{\eta} \right) \right]$$

$$ikv = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{k}{s^2} \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} - \frac{v}{\eta^2} + k^2 \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{v}{\eta} \right) \right]$$

$$ikp = -\left(k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{v}{\eta} \right)$$

$$p = \rho + T$$

$$iT = i \frac{\gamma - 1}{\gamma} p + \frac{1}{s^2 \sigma^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} + k^2 \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \right) \quad (2)$$

همچنین شرایط مرزی در مرکز و دیواره لوله به صورت زیر تعریف شده است [11].

- در مرکز لوله، $\eta = 0$: به علت تقارن مرکزی شرط مرزی

راه دور ساخته شده دارای مشخصات زیر است: لوله اول با قطر 0.8 میلی‌متر و طول 10 سانتی‌متر، لوله دوم با قطر 2 میلی‌متر و طول 10 سانتی‌متر و لوله استهلاک با همان قطر و طول 5 متر.

در حالت ایده‌آل بهتر است فرآیند کالیبراسیون در یک اطاق بدون پژواک انجام گیرد. با این حال در مطالعات مختلف از موج صوتی صفحه‌ای ایجاد شده در لوله برای این منظور استفاده شده است [14,13]. در مطالعه حاضر برای ایجاد نویز سفید صفحه‌ای در محدوده فرکانس 100-20000 هرتز از یک لوله با طول 110 میلی‌متر و قطر 10 میلی‌متر به همراه یک اسپیکر کیفیت بالا به‌عنوان کالیبراتور استفاده شده است. با توجه به تئوری آکوستیک [15]، انتشار امواج صوتی در داخل لوله‌ها تنها به ازای $kR \leq 1.84$ به صورت موج صفحه‌ای خواهد بود. که R شعاع لوله و $k = \omega/c_0$ عدد موج آکوستیکی است. بنابراین با توجه به ابعاد لوله، کالیبراسیون انجام گرفته تا فرکانس 20 کیلوهرتز دارای اعتبار است. در فرکانس‌های بالاتر، انتشار نویز سفید داخل لوله به‌صورت موج صفحه‌ای نخواهد بود. لازم به ذکر است که استفاده از صوت فقط در مرحله کالیبراسیون سیستم میکروفن از راه دور و تعیین دقیق پاسخ دینامیکی آن انجام می‌گیرد. در نهایت جهت انجام بررسی‌های آکوستیکی با داشتن تابع انتقال سیستم می‌توان از طریق اندازه‌گیری نوسانات فشار در محل میکروفن دوردست، نوسانات فشار در سطح مدل ناشی از هیدرودینامیک سیال را به‌دست آورد.

ساده‌ترین راه جهت تعیین تابع انتقال سیستم از طریق کالیبراسیون تجربی، استفاده از چگالی طیفی خودکار¹ و متقابل² نوسانات فشار است. با توجه به روابط بندت و پیرسول [16]، چگالی طیفی خودکار و متقابل برای نوسانات فشار میکروفن مرجع و دوردست به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\begin{aligned} \Phi_{0,0}(\omega) &= [P_0(\omega)P_0^*(\omega)] \\ \Phi_{m,m}(\omega) &= [P_m(\omega)P_m^*(\omega)] \\ \Phi_{0,m}(\omega) &= [P_0(\omega)P_m^*(\omega)] \end{aligned} \quad (11)$$

با قرار دادن P_0 از رابطه (9) در رابطه (11) داریم:

$$\Phi_{0,m}(\omega) = \left[\frac{P_m(\omega)}{T_{0,m}(\omega)} P_m^*(\omega) \right] = \frac{\Phi_{m,m}(\omega)}{T_{0,m}(\omega)} \quad (12)$$

بنابراین تابع انتقال سیستم میکروفن از راه دور به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد.

$$T_{0,m}(\omega) = \frac{\Phi_{m,m}(\omega)}{\Phi_{0,m}(\omega)} \quad (13)$$

محاسبه چگالی طیفی متقابل برای نوسانات فشار میکروفن مرجع و دوردست نیازمند اندازه‌گیری هم‌زمان نوسانات ناپایای فشار روی سطح و در محل میکروفن دوردست وجود نداشته و لذا فرآیند دو مرحله‌ای نشان داده شده در "شکل 2" پیشنهاد می‌شود. در این روش علاوه بر ذخیره ولتاژ خروجی از میکروفن‌ها باید هم‌زمان ولتاژ نویز سفید ورودی به اسپیکر نیز ذخیره گردد. استفاده از چگالی طیفی متقابل بین نوسانات فشار میکروفن دوردست و ولتاژ نویز سفید ورودی به اسپیکر باعث شده که در این روش نیازی به نصب میکروفن مرجع در کنار سوراخ سیستم میکروفن از راه دور نباشد (شکل 1).

در بیشتر کاربردهای عملی امکان اندازه‌گیری هم‌زمان نوسانات ناپایای فشار روی سطح و در محل میکروفن دوردست وجود نداشته و لذا فرآیند دو مرحله‌ای نشان داده شده در "شکل 2" پیشنهاد می‌شود. در این روش علاوه بر ذخیره ولتاژ خروجی از میکروفن‌ها باید هم‌زمان ولتاژ نویز سفید ورودی به اسپیکر نیز ذخیره گردد. استفاده از چگالی طیفی متقابل بین نوسانات فشار میکروفن دوردست و ولتاژ نویز سفید ورودی به اسپیکر باعث شده که در این روش نیازی به نصب میکروفن مرجع در کنار سوراخ سیستم میکروفن از راه دور نباشد (شکل 1).

و با انجام تبدیل فوریه داریم:

$$P_m(\omega) = T_{0,m}(\omega)P_0(\omega) \quad (9)$$

که مقادیر P_m ، $T_{0,m}$ ، P_0 مختلط می‌باشند. بنابراین با توجه به رابطه فوق با داشتن تابع انتقال یک سیستم میکروفن از راه دور (از طریق کالیبراسیون تجربی و یا حل تحلیلی) می‌توان از طریق اندازه‌گیری نوسانات فشار در محل میکروفن دوردست، نوسانات فشار ناپایای سطح در محل میکروفن مرجع را محاسبه نمود. در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی تابع انتقال سیستم میکروفن از راه دور از حل تحلیلی انتشار صدا در یک لوله صلب با قطر ثابت تیجیدیمن به همراه روش بازگشتی برگ و تیجیدیمن [12] برای مجموعه‌ای از لوله‌ها با قطر مختلف استفاده شده است. سیستم میکروفن از راه دور استفاده شده در این مطالعه شامل چهار بخش زیر است (شکل 1).

- لوله اول با قطر کم ما بین سطح مدل و دیفیوزر (R_1, L_1)
- دیفیوزر جهت تغییر قطر بین لوله اول و دوم ($0 < \theta_d \leq 90$)
- لوله دوم با قطر زیاد مابین دیفیوزر و میکروفن دوردست (R_2, L_2)
- لوله استهلاک (R_3, L_3)

سه قسمت اول، سوم و چهارم، لوله با قطر ثابت بوده و نسبت فشار دو سر لوله‌ها با توجه به روابط فوق قابل محاسبه است. برای مدل‌سازی قسمت دوم یعنی دیفیوزر می‌توان آن را به‌صورت تغییرات پله‌ای تعداد n لوله به هم پیوسته با طول یکسان در نظر گرفت. بنابراین مجموعه این سیستم را می‌توان شامل $N = n + 3$ لوله دانست که با توجه به روابط (5) و (6)، نسبت فشار دو سر هر یک از لوله‌ها قابل محاسبه است. در نهایت با داشتن نسبت فشار دو سر تمام لوله‌های متصل به هم، تابع انتقال سیستم میکروفن از راه دور یعنی نسبت فشار اندازه‌گیری شده توسط میکروفن دوردست به فشار مرجع (واقع در سطح مدل) از رابطه (10) به‌دست خواهد آمد.

$$\frac{p_m}{p_0} = \frac{p_{n+2}}{p_0} = \frac{p_1}{p_0} \frac{p_2}{p_1} \dots \frac{p_{n+1}}{p_n} \frac{p_{n+2}}{p_{n+1}} \quad (10)$$

4- تعیین پاسخ دینامیکی سیستم از طریق کالیبراسیون تجربی

تعیین پاسخ دینامیکی سیستم میکروفن از راه دور از هر دو روش تحلیلی و تجربی امکان‌پذیر است. روش‌های تحلیلی بیشتر در مرحله طراحی یک سیستم میکروفن از راه دور و رسیدن به پاسخ دینامیکی مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، تعیین دقیق پاسخ دینامیکی یک سیستم میکروفن از راه دور، تنها از طریق روش کالیبراسیون تجربی امکان‌پذیر است. در این بخش، فرآیند انجام کالیبراسیون تجربی و بدست آوردن پاسخ دینامیکی برای یک سیستم میکروفن از راه دور نمونه با مشخصات هندسی معلوم مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم میکروفن از

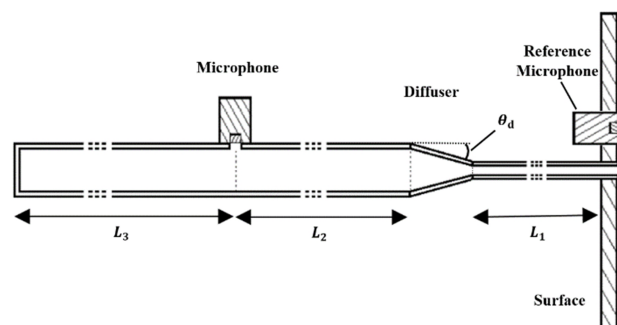


Fig. 1 Remote microphone system Schematic

شکل 1 نمای شماتیک سیستم میکروفن از راه دور

¹ Auto-spectral density

² Cross-spectral density

کوچک FG-23329-P07 استفاده شده است (شکل 1). میکروفن های FG استفاده شده دارای قطر و ارتفاع 2.5 mm بوده و قطر ناحیه حسگر صدا 0.8 mm است. کارایی عالی میکروفن های FG برای اندازه گیری فشار ناپایای سطح در مطالعات انجام شده قبلی به اثبات رسیده است [17,5]. میکروفن های FG با استفاده از یک منبع تغذیه 10 کاناله (ساخت دانشگاه یزد) راه اندازی شده و داده برداری با استفاده از یک سیستم پردازش سیگنال خروجی مدل DT9847-2-2 انجام گرفته است. فرکانس داده برداری برابر با 40 کیلوهرتز بوده و در مجموع تعداد 800 هزار داده در مدت زمان 20 ثانیه ذخیره شده است. در "شکل 3" تجهیزات آزمایش نشان داده شده است.

5- نتایج عددی و بحث

در این بخش ابتدا به منظور صحت سنجی مدل سازی تحلیلی ارائه شده، نتایج حاصل از مدل سازی تحلیلی (با توجه به مشخصات هندسی سیستم میکروفن از راه دور ساخته شده) با نتایج کالیبراسیون تجربی مقایسه شده است. در ادامه پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل سازی انجام گرفته، اثر پارامترهای هندسی مختلف یک سیستم میکروفن از راه دور روی پاسخ دینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ضمن از نرم افزار متلب نسخه R2014a برای نوشتن تمامی کدها استفاده شده است.

در "شکل 4" مقایسه تغییرات دامنه و فاز تابع انتقال پیش بینی شده با نتایج کالیبراسیون تجربی بر حسب فرکانس نشان داده شده است. با توجه به "شکل 4"، مدل سازی تحلیلی انجام گرفته مخصوصاً در پیش بینی فاز پاسخ دینامیکی سیستم دارای دقت بسیار مناسبی در کل محدوده فرکانسی است. اختلافات ناچیز ممکن است ناشی از فرضیات ساده سازی، عدم اتصال صحیح لوله ها، لب پدیدگی ها، نامتقارن بودن لوله ها، عدم قطعیت ابزار اندازه گیری و تاثیر نویز محیط باشد.

در حالت ایده آل طول و قطر لوله ها باید با توجه به محدودیت های هندسه مورد مطالعه به گونه ای طراحی گردد که کمترین انحراف در پاسخ دینامیکی سیستم در محدوده فرکانسی مورد مطالعه وجود داشته باشد. این انحرافات عمدتاً ناشی از پدیده تشدید و تضعیف لزجی است. در ادامه پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل سازی انجام گرفته، اثر پارامترهای هندسی مختلف یک سیستم میکروفن از راه دور شامل تغییر قطر لوله ها، طول لوله استهلاک، طول لوله اول و طول لوله دوم روی پاسخ دینامیکی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تمامی موارد به استثنای مواردی که مقدار

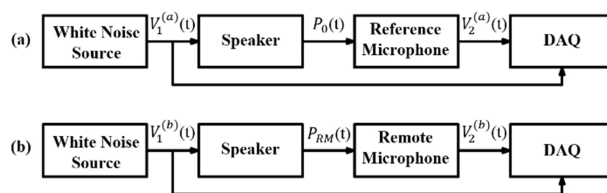


Fig. 2 Two stages Calibration procedure of the remote microphone system, a) Determination of the response of the speaker, b) Determination of the response of the remote microphone system

شکل 2 فرآیند دو مرحله ای کالیبراسیون سیستم میکروفن از راه دور، (a) تعیین پاسخ دینامیکی اسپیکر، (b) تعیین پاسخ دینامیکی سیستم میکروفن از راه دور

دور نباشد.

در مرحله اول میکروفن مرجع به طور مماس بر سطح روی یک صفحه تخت نصب شده و لوله کالیبراتور روی آن قرار می گیرد. سپس با ایجاد یک نویز سفید، سیگنال ورودی به اسپیکر $V_1^{(a)}(t)$ و سیگنال خروجی از میکروفن مرجع، $V_2^{(a)}(t)$ ، به طور همزمان ذخیره می گردد. با داشتن $V_2^{(a)}(t)$ و ضریب حساسیت میکروفن مرجع، S_{ref} ، نوسانات فشار اندازه گیری شده توسط میکروفن مرجع $P_0(t)$ و پاسخ دینامیکی کالیبراتور $H_{Sp}(\omega)$ به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$P_0(t) = \frac{V_2^{(a)}(t)}{S_{ref}} \quad (14)$$

$$H_{Sp}(\omega) = \frac{[P_0(\omega)V_1^{(a)*}(\omega)]}{[V_1^{(a)}(\omega)V_1^{(a)*}(\omega)]} = \frac{\Phi_{V_2V_1}^{(a)}(\omega)}{\Phi_{V_1V_1}^{(a)}(\omega)} \frac{1}{S_{ref}} \quad (15)$$

که $\Phi_{V_2V_1}^{(a)}(\omega)$ چگالی طیفی متقابل بین سیگنال های $V_2^{(a)}(t)$ و $V_1^{(a)}(t)$ بوده و $\Phi_{V_1V_1}^{(a)}(\omega)$ چگالی طیفی خودکار سیگنال $V_1^{(a)}(t)$ است. در مرحله دوم، لوله کالیبراتور روی سوراخ ورودی سیستم میکروفن از راه دور (ورودی لوله اول واقع در سطح مدل) قرار می گیرد. مانند مرحله اول با ایجاد یک نویز سفید، سیگنال ورودی به اسپیکر $V_1^{(b)}(t)$ و سیگنال خروجی از میکروفن دور دست، $V_2^{(b)}(t)$ ، به طور همزمان ذخیره می گردد. در نهایت با مشخص بودن پاسخ دینامیکی کالیبراتور $H_{Sp}(\omega)$ از مرحله اول، پاسخ دینامیکی سیستم میکروفن از راه دور $H_{RM}(\omega)$ بر حسب V/Pa با استفاده از روابط زیر تعیین خواهد شد.

$$H_{Sp}(\omega) H_{RM}(\omega) = \frac{[V_2^{(b)}(\omega)V_1^{(b)*}(\omega)]}{[V_1^{(b)}(\omega)V_1^{(b)*}(\omega)]} = \frac{\Phi_{V_2V_1}^{(b)}(\omega)}{\Phi_{V_1V_1}^{(b)}(\omega)} \quad (16)$$

$$H_{RM}(\omega) = \frac{\Phi_{V_2V_1}^{(b)}(\omega) \Phi_{V_1V_1}^{(a)}(\omega)}{\Phi_{V_1V_1}^{(b)}(\omega) \Phi_{V_2V_1}^{(a)}(\omega)} S_{ref} \quad (17)$$

با تقسیم $H_{RM}(\omega)$ بر ضریب حساسیت میکروفن دور دست S_{RM} تابع انتقال سیستم میکروفن از راه دور به صورت بدون بعد بدست خواهد آمد.

$$T_{0,m}(\omega) = \frac{H_{RM}(\omega)}{S_{RM}} = \frac{\Phi_{V_2V_1}^{(b)}(\omega) \Phi_{V_1V_1}^{(a)}(\omega) S_{ref}}{\Phi_{V_1V_1}^{(b)}(\omega) \Phi_{V_2V_1}^{(a)}(\omega) S_{RM}} = \frac{\Phi_{P_mV_1}^{(b)}(\omega) \Phi_{V_1V_1}^{(a)}(\omega)}{\Phi_{V_1V_1}^{(b)}(\omega) \Phi_{P_0V_1}^{(a)}(\omega)} \quad (18)$$

در مطالعه حاضر برای اندازه گیری نوسانات فشار مرجع روی سطح از یک میکروفن کندانسوری بسیار دقیق یک چهارم اینچ مدل G.R.A.S 40BP و برای اندازه گیری نوسانات فشار در محل میکروفن دور دست از میکروفن های

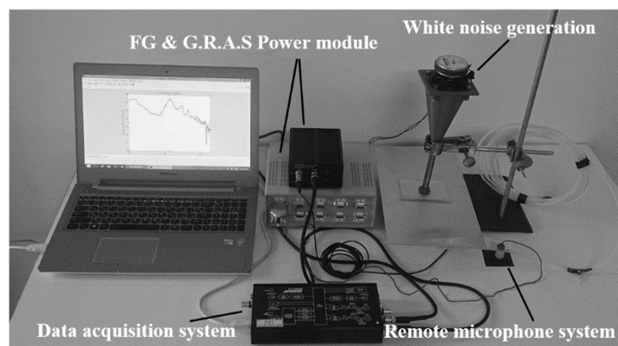


Fig. 3 Experimental setup including white noise generation system, microphone's power module, remote microphone system and data acquisition system

شکل 3 تجهیزات آزمایش شامل مکانیزم ایجاد نویز سفید، منبع تغذیه میکروفن ها، سیستم میکروفن از راه دور و سیستم پردازش سیگنال

یک سیستم میکروفن از راه دور با استفاده از یک لوله استهلاک با طول مناسب می‌توان از عدم حضور چنین هارمونیک‌هایی که ممکن است به میکروفن آسیب بزند، اطمینان حاصل نمود.

اثر طول لوله اول و دوم روی دامنه و فاز پاسخ دینامیکی سیستم (به ازای طول لوله استهلاک برابر با 9 متر) به ترتیب در "شکل‌های 7 و 8" نشان داده شده است. با توجه به "شکل a 7"، موقعیت و اندازه هارمونیک‌های محدوده فرکانس بالا وابسته به طول لوله اول بوده و با افزایش آن به واسطه افزایش طول منجر به افزایش اصطکاک دیواره و در نتیجه کاهش حساسیت افزایش طول منجر به افزایش اصطکاک دیواره و در نتیجه کاهش حساسیت مخصوصاً در فرکانس‌های بالا شده است. "شکل b 7" نشان‌دهنده افزایش شیب نمودار تغییرات فاز سیستم با افزایش طول لوله اول است. دلیل این امر افزایش زمان مورد نیاز برای امواج صوتی جهت طی کردن طول لوله اول است.

با توجه به "شکل 8" در حالی که با افزایش طول لوله دوم، هارمونیک‌های محدوده فرکانس پایین (وابسته به طول لوله استهلاک) و محدوده فرکانس بالا (وابسته به طول لوله اول) تقریباً بدون تغییر مانده‌اند، حساسیت کلی

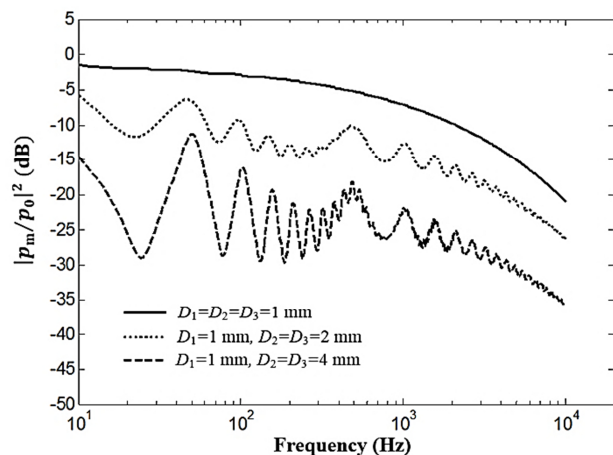


Fig. 5 Variation of system's dynamic response amplitude with various second tube diameters ($L_1=30$ cm, $L_2=10$ cm, $L_3=3$ m)

شکل 5 تغییرات دامنه پاسخ دینامیکی سیستم به ازای تغییر قطر لوله دوم ($L_1=30$ cm, $L_2=10$ cm, $L_3=3$ m)

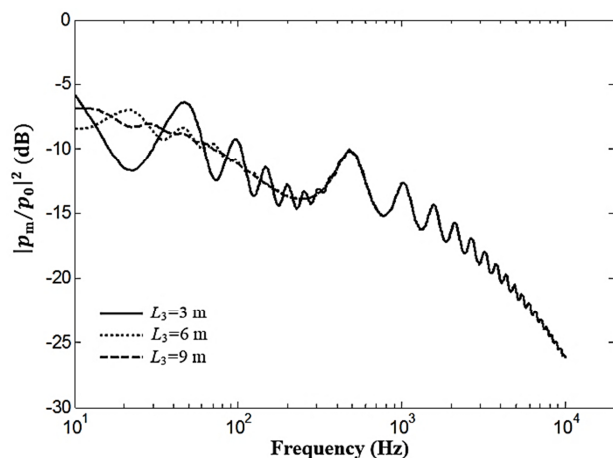


Fig. 6 Variation of system's dynamic response amplitude with various damping duct lengths ($L_1=30$ cm, $L_2=10$ cm, $D_1=1$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

شکل 6 تغییرات دامنه پاسخ دینامیکی سیستم به ازای تغییر طول لوله استهلاک ($L_1=30$ cm, $L_2=10$ cm, $D_1=1$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

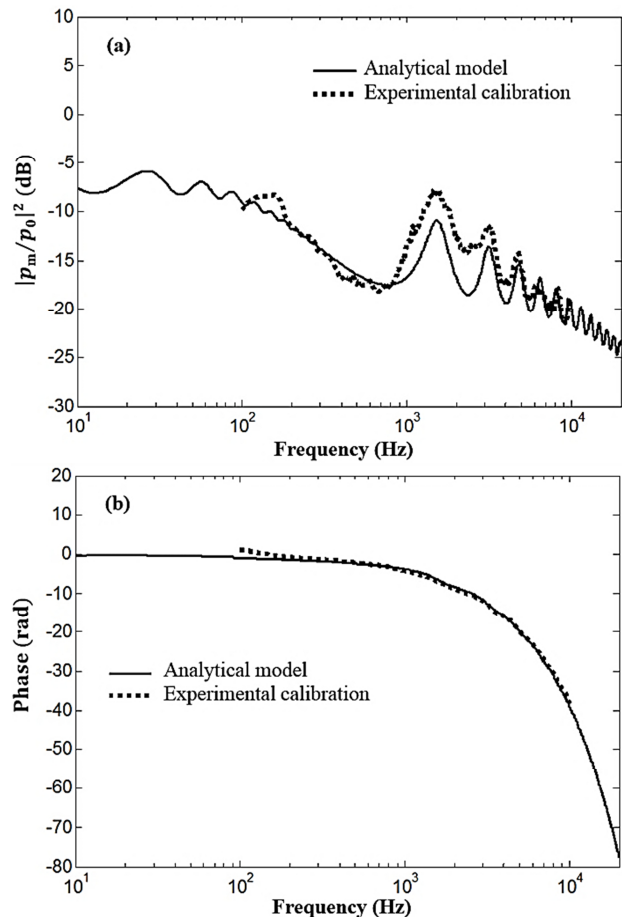


Fig. 4 Comparison of variation of (a) amplitude and (b) phase of predicted transfer function with experimental calibration results ($L_1=L_2=10$ cm, $L_3=5$ m, $D_1=0.8$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

شکل 4 مقایسه تغییرات (a) دامنه و (b) فاز تابع انتقال پیش‌بینی شده با نتایج کالیبراسیون تجربی ($L_1=L_2=10$ cm, $L_3=5$ m, $D_1=0.8$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

پارامترهای هندسی ذکر شده است قطر لوله اول تا سوم به ترتیب 1، 2 و 2 میلی‌متر و طول لوله‌های اول تا سوم و زاویه واگرایی دیفیوزر به ترتیب برابر با 30، 10 و 300 سانتی‌متر و 45 درجه در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به این که تغییرات فاز پاسخ دینامیکی سیستم بیش از این که وابسته به تغییر قطر لوله‌ها و طول لوله استهلاک باشد وابسته به طول لوله اول و دوم است برای رعایت اختصار در برخی موارد نمودار مربوط به تغییرات فاز ارائه نشده است.

در "شکل 5" مقایسه دامنه پاسخ دینامیکی سیستم به ازای حالت قطر لوله اول و دوم برابر و حالت قطر لوله‌ها متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل تغییر قطر لوله دوم نسبت به لوله اول که در بیشتر کاربردهای عملی جهت نصب میکروفن ناچار به انجام آن هستیم منجر به ایجاد تشدید شده است. همان‌طور که مشخص است پدیده تشدید در دو ناحیه، یکی در محدوده فرکانس‌های پایین و دیگری در فرکانس‌های بالا رخ داده است. همچنین افزایش قطر لوله دوم از 2 میلی‌متر به 4 میلی‌متر اگرچه باعث افزایش انحراف دامنه پاسخ فرکانسی سیستم شده اما تغییر محسوسی در فرکانس تشدید ایجاد ننموده است.

اثر طول لوله استهلاک روی پاسخ دینامیکی سیستم در "شکل 6" نشان داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود افزایش طول لوله استهلاک باعث کاهش هارمونیک‌های محدوده فرکانس پایین شده است. بنابراین در

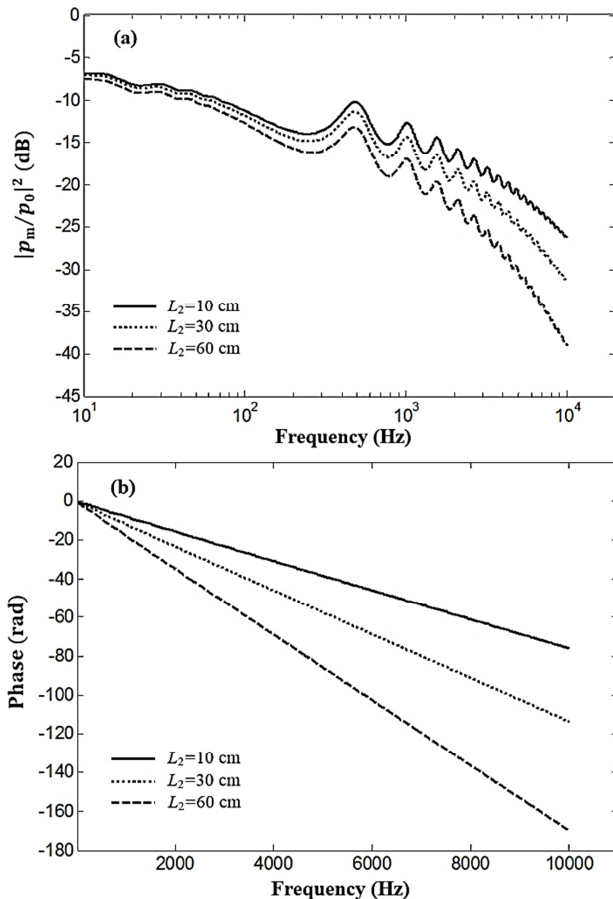


Fig. 8 Variation of system's dynamic response (a) amplitude and (b) phase with various second tube lengths ($L_1=30$ cm, $L_3=3$ m, $D_1=1$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

شکل 8 تغییرات (a) دامنه و (b) فاز پاسخ دینامیکی سیستم به ازای تغییر طول لوله دوم ($L_1=30$ cm, $L_3=3$ m, $D_1=1$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

هندسی هر مدل، پارامترهای مختلف سیستم میکروفن از راه دور جهت دستیابی به پاسخ دینامیکی مطلوب قبل از ساخت نمونه اصلی بهینه گردد.

7- فهرست علائم

c_0	سرعت صوت (ms^{-1})
C_p, C_v	به ترتیب گرمای ویژه در فشار و حجم ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	قطر لوله (m)
f	فرکانس (Hz)
k	فرکانس کاهش یافته، عدد موج آکوستیکی (m^{-1})
L, l	طول لوله (m)، طول کاهش یافته
N	تعداد لوله های سیستم میکروفن از راه دور
$p(t)$	نوسانات فشار در حوزه زمان ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
$P(\omega)$	نوسانات فشار در حوزه فرکانس ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
R	شعاع لوله (m)
s	عدد موج برشی
T	دما (K)
$T_{0,m}(\omega)$	تابع انتقال سیستم میکروفن از راه دور
u	سرعت در راستای محوری (ms^{-1})
v	سرعت در راستای شعاعی (ms^{-1})

علائم یونانی

سیستم مخصوصاً در فرکانس های بالا کاهش یافته است. به علاوه با افزایش طول لوله دوم، به واسطه افزایش فاصله بین سطح و میکروفن، شیب نمودار فاز سیستم افزایش یافته است.

6- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به منظور پیش بینی پاسخ دینامیکی سیستم میکروفن از راه دور و بررسی اثر پارامترهای مختلف هندسی سیستم شامل تغییر قطر لوله ها، طول لوله استهلاک، طول لوله اول و طول لوله دوم روی پاسخ دینامیکی آن از حل تحلیلی انتشار امواج صدا داخل لوله های صلب استفاده شده است. همچنین پاسخ دینامیکی یک سیستم میکروفن از راه دور نمونه از طریق کالیبراسیون تجربی تعیین شده است. مطابقت نتایج پیش بینی تحلیلی و نتایج حاصل از کالیبراسیون تجربی، نشان دهنده دقت روش تحلیلی پیشنهادی در مدل سازی سیستم میکروفن از راه دور است. نتایج نشان داد که تغییر قطر لوله ها منجر به پدیده تشدید شده است. همچنین هارمونیک های فرکانس پایین وابسته به طول لوله استهلاک بوده و با افزایش آن کاهش می یابد. فرکانس تشدید در محدوده فرکانس های بالا وابسته به طول لوله اول بوده و با افزایش آن کاهش یافته است. به علاوه افزایش طول لوله اول و دوم منجر به افزایش شیب نمودار فاز سیستم شده است. در نهایت مدل سازی تحلیلی انجام گرفته این امکان را فراهم نموده که با توجه به محدودیت های

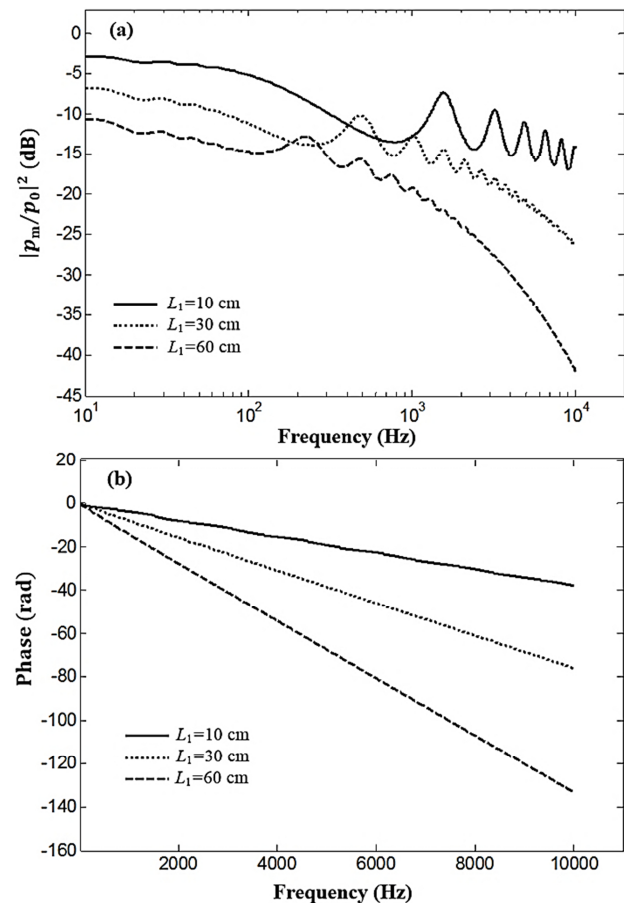


Fig. 7 Variation of system's dynamic response (a) amplitude and (b) phase with various first tube lengths ($L_2=10$ cm, $L_3=3$ m, $D_1=1$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

شکل 7 تغییرات (a) دامنه و (b) فاز پاسخ دینامیکی سیستم به ازای تغییر طول لوله اول ($L_2=10$ cm, $L_3=3$ m, $D_1=1$ mm, $D_2=D_3=2$ mm)

که ϕ تابع اتلاف، بیانگر انتقال حرارت ناشی از اصطکاک داخلی است.

$$\phi = 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}}{r} \right)^2 \right] + \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right]^2 - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \right]^2$$

با فرض

$$\begin{aligned} \bar{u} &= a_0 u(x, r) e^{i\omega t}, & \bar{v} &= a_0 v(x, r) e^{i\omega t} \\ \bar{\rho} &= \rho_s [1 + \rho(x, r) e^{i\omega t}], & \bar{T} &= T_s [1 + T(x, r) e^{i\omega t}] \\ \bar{p} &= p_s [1 + p(x, r) e^{i\omega t}] = \frac{\rho_s a_0^2}{\gamma} [1 + p(x, r) e^{i\omega t}] \end{aligned}$$

جایی که u, v, ρ, p, T نوسانات سینوسی که حک هستند. به با معرفی مختصات بدون بعد به صورت زیر مجموعه رد ط

$$\xi = \omega x / a_0, \quad \eta = r / R$$

9- مراجع

- [1] S. Batill, J. Nebres, Data correction for pressure transmission lines using discrete time series models, *International Congress on IEEE*, pp. 295-303, 1991.
- [2] J. R. van Ommen, J. C. Schouten, M. L. vander Stappen, C. M. van den Bleek, Response characteristics of probe-transducer systems for pressure measurements in gas-solid fluidized beds: How to prevent pitfalls in dynamic pressure measurements, *Powder Technology*, Vol. 106, No. 3, pp. 199-218, 1999.
- [3] D. Englund, W. Richards, The infinite line pressure probe, *ISA Transactions*, Vol. 24, No. 2, pp. 11-19, 1985.
- [4] S. Perennes, M. Roger, Aerodynamic noise of a two-dimensional wing with high-lift devices, *AIAA paper*, pp. 98-2338, 1998.
- [5] A. Garcia-Sagrado, T. Hynes, Wall-pressure sources near an airfoil trailing edge under separated laminar boundary layers, *AIAA Journal*, Vol. 49, No. 9, pp. 1841-1856, 2011.
- [6] M. Gruber, *Airfoil noise reduction by edge treatments*, PhD thesis, University of Southampton, 2012.
- [7] H. Yang, D. Sims-Williams, L. He, Unsteady pressure measurement with correction on tubing distortion, *Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines*, Springer Netherlands, pp. 521-529, 2006.
- [8] G. Kirchhoff, Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung, *Annalen der Physik*, Vol. 210, No. 6, pp. 177-193, 1868.
- [9] J. W. S. B. Rayleigh, *The theory of sound*, Second Edition, pp. 319-326, London: Macmillan, 1896.
- [10] C. Zwikker, C. W. Kosten, *Sound absorbing materials*: Elsevier, 1949.
- [11] H. Tijdeman, On the propagation of sound waves in cylindrical tubes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-33, 1975.
- [12] H. Bergh, H. Tijdeman, *Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems*, Report NLR-TR F.238, National Aero and Astronautical Research Institute, Amsterdam, 1965.
- [13] É. Salze, C. Bailly, O. Marsden, E. Jondeau, D. Juvé, An experimental characterization of wall pressure wavevector-frequency spectra in the presence of pressure gradients, *20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Atlanta, GA, 16-20 June 2014.
- [14] Q. Leclère, A. Pereira, A. Finez, P. Souchotte, Indirect calibration of a large microphone array for in-duct acoustic measurements, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 376, pp. 48-59, 2016.
- [15] F. J. Fahy, P. Gardonio, *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*: Second Edition, pp. 282-315, London : Academic press, 2007.
- [16] J. S. Bendat, A. G. Piersol, *Random data: analysis and measurement procedures*, 3rd Edition, pp. 300-352, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [17] A. Afshari, M. Azarpeyvand, A. A. Dehghan, M. Szöke, Trailing Edge Noise Reduction Using Novel Surface Treatments, *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Lyon, France, 30 May-1 June, 2016.

η راستای شعاعی (m)

γ نسبت گرمای ویژه

Γ ثابت انتشار

λ هدایت حرارتی ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)

μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ω فرکانس زاویه‌ای (rad Hz)

σ ریشه دوم عدد پراشتل

$\Phi(\omega)$ چگالی طیفی ($\text{kg}^2\text{m}^{-2}\text{s}^{-4}\text{Hz}^{-1}$)

ρ چگالی (kgm^{-3})

θ_d زاویه دیفیوزر (rad)

ξ راستای محوری (m)

بالانویس‌ها

a مرحله اول

b مرحله دوم

زیرنویس‌ها

m اندازه‌گیری شده

ref مرجع

RM میکروفن از راه دور

Sp اسپیکر

8- پیوست

معادلات اساسی حرکت سیال داخل یک لوله دایره‌ای عبارتند از:

• معادلات ناویر-استوکس

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left\{ \left[\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \right] \right\} \\ \bar{\rho} \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \mu \left\{ \left[\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} - \frac{\bar{v}}{r^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \right] \right\} \end{aligned}$$

• معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial r} + \bar{\rho} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\bar{v}}{r} \right] = 0$$

• معادله حالت برای گاز ایده‌آل

$$\bar{p} = \bar{\rho} R_0 \bar{T}$$

• معادله انرژی

$$\begin{aligned} \bar{\rho} C_p \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] &= \lambda \left[\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \\ &\quad + \bar{u} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \mu \phi \end{aligned}$$