

(علمی-پژوهشی)

# بررسی عددی و تحلیلی ضریب جذب صوت لاینر آکوستیکی جهت کاهش صوت موتور توربوفن

ایمان بهمن جهرمی<sup>۱\*</sup> و هادی  
دستورانی<sup>۱\*\*</sup>۱- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و  
فناوری، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

\* استادیار

\*\* دانش آموخته دکتری (نویسنده پاسخگو)،  
ایمیل:

hadi.dast@gmail.com

با توجه به الزامات زیست‌محیطی در کاهش نویز هواپیما، استفاده از لاینرهای آکوستیکی در ورودی موتورهای توربوفن امری رایج و ضروری می‌باشد. این لاینرها در هندسه‌های مختلف طراحی می‌شوند. درک صحیح اثرات پارامترهای مختلف در طراحی این لاینرها بسیار ضروری می‌باشد. در این مقاله یکی از نمونه‌های رایج، لاینرهای حفره‌ای تاشو (به صورت L شکل) مورد بررسی قرار گرفته است. مزیت این هندسه کاهش فضای مورد نیاز برای به کارگیری لاینر ضمن حفظ عمق لاینر است. در مقاله حاضر از نرم افزار کامسول برای شبیه‌سازی عددی آکوستیک لاینر حفره‌ای تاشو در حالت دوبعدی استفاده شده و تأثیر ارتفاع سلول‌های لانه زنبوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد افزایش ارتفاع سلول‌های لانه زنبوری در فرکانس‌های پایین ( $f < 1700$  Hz) موجب افزایش ضریب جذب صوت می‌شود، در حالی که در فرکانس‌های بالای ۱۷۰۰ Hz ضریب جذب کاهش می‌یابد و این کاهش در فرکانس‌های بالای ۳۵۰۰ Hz بسیار زیاد می‌شود. بر مبنای نتایج شبیه‌سازی برای هندسه کلی در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر ارتفاع ۲۰ mm برای ارتفاع سلول‌های لانه زنبوری مقدار مناسبی است. همچنین، نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی و تحلیلی مقایسه شده است که حاکی از صحت و دقت خوب نتایج شبیه‌سازی می‌باشد. این بدین معنا است که شبیه‌سازی عددی دو بعدی لاینر آکوستیکی می‌تواند در فاز طراحی اولیه لاینرهای آکوستیکی و بررسی پارامتری مسئله‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک لاینر، صفحه سوراخ‌دار، ضریب جذب صوت، موتور توربوفن

## Numerical and Analytical Study of Acoustic Liner Absorption Coefficient to Reduce Turbofan Engine Noise

Due to environmental requirements in reducing aircraft noise, using acoustic liners at the inlet of turbofan engines is necessary. These liners are designed in different geometries. Understanding the effects of different parameters in the design of these liners is essential. In this paper, one of the common examples, folded cavity liners (L-shaped), is investigated. The advantage of this geometry is reducing the space required to use the liner while maintaining the liner's depth. In the present paper, Comsol Multiphysics to simulate the acoustic of folded cavity liners numerically, and the effect of honeycomb cell height is investigated. The simulation results show that increasing the height of honeycomb cells at low frequencies ( $f < 1700$  Hz) increases the sound absorption coefficient, while at frequencies above 1700 Hz, the sound absorption coefficient decreases, and this decrease is very high at frequencies above 3500 Hz. Based on the simulation results for the general geometry considered in the present study, a height of 20 mm is an appropriate value for the height of honeycomb cells. In the present study, the numerical results are compared with experimental and analytical results, indicating the simulation results' good accuracy. This confirms the use of 2D numerical simulation in the initial design phase of acoustic liners and the parametric study of a similar problem.

**Keywords:** Acoustic Liner, Perforated Plate, Sound Absorption Coefficient, Turbofan Engine

I. Bahman-Jahromi,<sup>1\*</sup> and H.  
Dastourani<sup>1\*\*\*</sup>1- Aerospace Research Institute,  
Ministry of Science, Research and  
Technology, Postal Code:  
1465774111, Tehran, IRAN

\* Assistant Professor

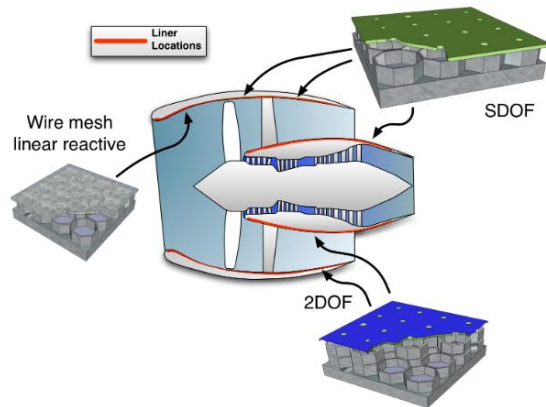
\*\* Ph.D. Holder, (Corresponding  
Author): Email:

hadi.dast@gmail.com

## (علمی-پژوهشی)

ایمان بهمن جهرمی و هادی دستورانی

پیدا کنند. مفهوم لاینرهای حفراهی تاشو<sup>۱</sup> در مرکز تحقیقاتی دانشگاه رولز-رویس توسعه داده شده و طرح صوتی آنها در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۴]. این لاینرها به واسطه هندسه تاشو توانایی عمل به عنوان ترکیبی از لاینر عمیق و کم عمق را دارند. بنابراین، لاینر حفراهی تاشو می‌تواند به طور مؤثری فرکانس‌های پایین و بالا را جذب نماید.



شکل (۱): ساختار لاینرهای صوتی SDOF و 2DOF [۹].

تحقیقات متعددی در زمینه کاهش نویز موتورهای هواپیما وجود دارد که در ادامه تعدادی از آنها ارائه شده است. ساتلیف<sup>۲</sup> و همکاران کاربرد و تأثیر طرح لاینر فوم-فلز<sup>۳</sup> را در کاهش نویز موتور توربوفن مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتایج تجربی حاصله برای لاینر فوق را با نتایج یک لاینر تک درجه آزادی متداول مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد به لحاظ کاهش سطح توان آکوستیکی دو لاینر مذکور معادل می‌باشند [۱۰]. کاسالینو<sup>۴</sup> و همکاران از روش شبکه بولتزمن برای پیش‌بینی نویز پهنای باند توربوفن استفاده کردند. ایشان نتایج‌شان را با نتایج تجربی مقایسه کردند که بیان‌گر عملکرد خوب روش فوق می‌باشد [۱۱]. عبدالهی پور و سیدشمس طالقانی مطالعه‌ای در زمینه فناوری‌های نوین کاهش نویز در موتور انواع هواپیما انجام دادند. ایشان مروری بر انواع نازل‌های چورون یا دنداندار مورد استفاده در جهت کاهش نویز موتور هواپیما ارائه دادند [۱۲]. امیان و همکاران نیز میزان تأثیر نازل دنداندار بر کاهش شدت صوت در خروجی موتور جت را بررسی کردند. ایشان تأثیر پارامترهای هندسی نازل دنداندار را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که تغییر در طول دندانها تأثیر چندانی بر میدان جریان و سطح صدای تولیدی ندارد، در حالیکه میزان نفوذ

## ۱- مقدمه

میزان سطح صدای تولید شده توسط هواپیماهای عمومی و خصوصی طبق قوانین و آیین‌نامه‌های کشوری دارای محدودیت می‌باشد. بعضی فرودگاه‌ها نیز با توجه به موقعیت، شرایط محلی و محدوده زمانی (روز یا شب) محدودیت‌های بیشتری را در نظر می‌گیرند. در هواپیماهای توربوفن مدرن امروزی، موتور یکی از منبع‌های عمده صدای می‌باشد که بر روی محیط و ساکنین اطراف فرودگاه تأثیر می‌گذارد. این نوع صدای محیطی ایجاد شده توسط هواپیماها عمدتاً در هنگام برخاستن و نشستن در فرودگاه مورد توجه و باعث نگرانی است و در شرایط پرواز در حالت کروز هواپیما مطرح نیست. بر این اساس کنترل صدا در مجاری موتور مطابق با مقررات فرودگاه ضروری می‌باشد [۱-۲].

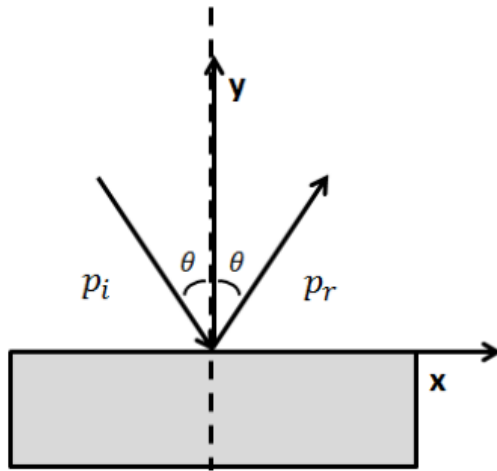
صدای موتور هواپیما ناشی از منبع‌های مختلف می‌باشد که تعدادی از آنها شامل فن، کمپرسور، توربین، محفظه احتراق و مخلوط جریان خروجی است. از میان منبع‌های تولید صدا در موتور هواپیما، صدای فن و جت بیشترین سهم را در هنگام برخاستن هواپیما دارد. در حالی که نویز فن و بدنه هواپیما مهمترین فاکتورهای سر و صدا در هنگام نشستن هستند. بنابراین، کاهش نویز فن تأثیر مهمی بر کاهش سطح سر و صدای کلی هواپیما دارد و توجه به آن از ضروریات است [۳-۵]. نویز تولید شده در موتور توربوفن فرکانس گسترده‌ای دارد ولی نویز با سطح فشار صوت بالا و تأثیرگذار در بازه فرکانسی ۳۰۰ تا ۶۰۰۰ Hz قرار دارد [۶-۷]. همچنین، ناحیه فرکانسی ناخواسته با بیشترین تأثیرگذاری برای انسان بازه‌ی ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ Hz می‌باشد [۸]. بر این اساس کاهش سطح نویز تولیدی در این بازه‌های فرکانسی اهمیت بالایی دارد.

صدای تولید شده توسط فن از طریق ورودی و خروجی محفظه به بیرون از موتور نفوذ کرده و در محیط پخش می‌شود. به منظور کاهش صدای خروجی از فن، لاینرهای آکوستیکی در محفظه موتور قرار داده می‌شود. این وسایل کاهنده صدا برای تضعیف فرکانس‌های تأثیرگذار در آلودگی صوتی محیط طراحی می‌شوند. دو نوع کلی لاینر صوتی مورد استفاده در موتور توربوفن وجود دارد که شامل لاینرهای تک درجه آزادی (SDOF) و دو درجه آزادی (2DOF) هستند (شکل ۱). عملکرد صوتی این لاینرها وابستگی زیادی به عمق سلول‌های لانه زنبوری (شکل ۱) دارد.

به منظور جذب فرکانس‌های پایین‌تر سلول‌های عمیق‌تری مورد نیاز است [۳] که همیشه امکان بکارگیری، به سبب محدودیت‌های طراحی مکانیکی، وجود ندارد. یک راه حل برای این مسئله، خم کردن سلول‌های لاینر می‌باشد به طوری که سلول‌های لاینر عمیق قابلیت نصب در فضاهای کم عمق را

1. Folded Cavity Liner
2. Sutliff
3. Foam-metal Liner
4. Casalino

انرژی تبدیل می‌شود. واکنش بیان‌گر توانایی تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل و بالعکس می‌باشد. این موضوع می‌تواند نتیجه انبساط و انقباض موج‌های آکوستیکی در محیط تراکم‌پذیر مثل هوا باشد [۱۶].



شکل (۲): شماتیکی از موج بازتاب شده از سطح صفحه تخت.

همچنین، اگر فرض شود موج با زاویه  $\theta$  از سطح بازتاب شود. در این صورت موج‌های انتشاری و بازتابی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p_i = Ae^{i(-k_x x + k_y y)} e^{i\omega t}, \quad (2)$$

$$p_r = Be^{i(-k_x x - k_y y)} e^{i\omega t}, \quad (3)$$

که  $A$  و  $B$  به ترتیب دامنه‌های موج‌های ورودی و بازتابی هستند. همچنین،  $\omega$  فرکانس شعاعی،  $t$  زمان و  $k$  عدد موج بوده و مولفه‌های  $k$  به صورت  $k_x = k \sin \theta$  و  $k_y = k \cos \theta$  هستند. در این حالت فشار در سطح،  $p_s$  در موقعیت  $y = 0$  برابر است با:

$$p_s = (p_i + p_r)_{y=0} = (A + B)e^{-ik_x x} e^{i\omega t}, \quad (4)$$

سرعت عمود بر صفحه  $u_{ns}$  که مجموع سرعت انتشاری عمود بر سطح  $u_{ni}$  و سرعت بازتابی عمود بر سطح  $u_{nr}$  است به صورت زیر می‌شود:

$$u_{ns} = (u_{ni} + u_{nr})_{y=0} = \frac{(A - B) \cos \theta}{\rho c} e^{-ik_x x} e^{i\omega t}, \quad (5)$$

و امپدانس آکوستیکی در سطح  $Z_n$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_n = \frac{p_s}{u_{ns}} = \rho c \frac{(A + B)}{(A - B) \cos \theta}, \quad (6)$$

که  $p_s$  در سطح مورد نظر و  $u_{ns}$  سرعت عمود بر سطح هستند.

دندانه‌ها و تعداد دندانه‌ها پارامترهای مهمی در افت سرعت در ناحیه مرکزی و شدت صوت می‌باشند [۱۳]. چمبرز<sup>۱</sup> و همکاران طراحی و بهینه‌سازی لاینر حفره‌ای تاشو را برای افزایش عملکرد آن در فرکانس‌های پایین انجام دادند. در این راستا نرم افزار عددی مورد نیاز برای بهینه‌سازی را توسعه دادند و ضخامت لاینر بهینه برای بازه فرکانسی ۲۵۰ تا ۴۰۰ Hz را استخراج نمودند [۱۴]. ما و سو<sup>۲</sup> مروری بر تاریخچه پیدایش لاینرها و توسعه انواع آن‌ها برای موتورهای هوایی را ارائه نمودند. این مقاله از مکانیزم‌های جذب صوت شروع و در ادامه انواع لاینرهای توسعه داده شده را بررسی کرده است [۱۵].

در تحقیق حاضر ابتدا توضیحات مختصری راجع به پیش زمینه آکوستیک برای فهم فیزیک و مدل‌سازی لاینر ارائه شده است و در ادامه از نرم افزار کامسول برای شبیه‌سازی و تحلیل لاینر آکوستیکی با هندسه تاشو استفاده شده است. ضریب جذب لاینر به وسیله شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول محاسبه شده و با نتایج تجربی و تحلیلی موجود اعتبارسنجی شده است.

## ۲- فیزیک مسئله و روش حل

در این بخش به فیزیک مسئله و روش حل در نظر گرفته شده پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱- جذب انتشار تک زاویه

ضریب جذب،  $\alpha$ ، به صورت نسبت توان آکوستیک جذب شده توسط یک سطح به توان انتشاری تعریف می‌شود که مقدار آن در بازه بین صفر تا یک قرار می‌گیرد. یک ضریب جذب بزرگ، مقادیر نزدیک به یک حاکی از این است که بخش بزرگی از توان صوتی توسط ماده جذب شده است (حالت مطلوب برای لاینر آکوستیکی). فرض کنید مطابق شکل ۲ یک صفحه تخت در موقعیت  $y=0$  قرار گرفته و موجی صفحه‌ای در خلاف جهت  $y$  با زاویه  $\theta$  با آن برخورد می‌کند. امپدانس آکوستیک برای این موج صوتی به صورت زیر تعریف می‌شود که دارای دو بخش حقیقی و موهومی است،

$$Z = \rho c (R + iX) \quad (1)$$

که  $R$  بخش مقاومتی و  $X$  بخش واکنشی امپدانس بوده و بدون بعد هستند. همچنین،  $\rho$  چگالی و  $c$  سرعت صوت می‌باشند. مقاومت بیان‌گر انرژی از دست رفته موج آکوستیک است که به سبب مثلاً اثرات ویسکوزیته یا ارتعاشات دیوار به نوع دیگری از

1. Chambers  
2. Ma and Su

## (علمی-پژوهشی)

ایمان بهمن جهرمی و هادی دستورانی

یک لاینر تک درجه آزادی (SDOF) شامل یک ورقه سوراخ‌دار<sup>۱</sup> است که به وسیله یک لایه از سلول‌های لانه زنبوری پشتیبانی می‌شود و بعد از لایه سلول‌ها یک صفحه صلب قرار دارد (شکل ۱-الف). در لاینر دو درجه آزادی یک لایه لانه زنبوری دیگر نیز وجود دارد که به وسیله یک صفحه سوراخ‌دار دیگر معروف به دیواره متخلخل<sup>۲</sup> از لایه لانه زنبوری قبلی جدا شده است (شکل ۱-ب) [۳-۴]. دو مزیت اصلی برای معرفی دیواره متخلخل وجود دارد. مقاومت لاینر به جای صفحه سوراخ‌دار (ورقه رویه) توسط دیواره متخلخل کنترل می‌شود که در نتیجه آن لاینرها در عمل مستقل از اثرات جریان سیال می‌شوند. علاوه بر این، مقاومت و واکنش در بازه‌ی خاصی از فرکانس‌ها می‌تواند بهتر کنترل شود. هرچند برای رسیدن به این هدف بایستی مقاومت ورقه سوراخ‌دار کوچک باشد [۱].

امپدانس این دو مدل به صورت تحلیلی برای شرایط یک بعدی قابل استخراج است که بر این اساس امپدانس تحلیلی برای لاینر SDOF به صورت زیر است [۱]:

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{Z_{fs}}{\rho c} - icot(kd), \quad (15)$$

که  $Z_{fs}$  امپدانس در ورقه رویه (صفحه سوراخ‌دار)،  $k$  عدد موج ( $k = 2\pi f/c$ ) و  $d$  عمق لاینر است (شکل ۳-الف). امپدانس تحلیلی برای لاینر دو درجه آزادی نیز به صورت زیر است [۱]:

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{Z_{fs}}{\rho c} + \frac{\frac{Z_{sep} \sin(kh_1) \cos(kh_2)}{\rho c} - icot(kd)}{1 + i \frac{Z_{sep} \sin(kh_1) \sin(kh_2)}{\rho c \sin(kd)}}, \quad (16)$$

که  $Z_{sep}$  امپدانس در دیواره متخلخل است و  $d$  عمق کلی سلول بوده و به صورت  $d = h_1 + h_2$  است و در آن  $h_1$  و  $h_2$  به ترتیب عمق قسمت پایینی و بالایی سلول است (شکل ۳-ب) [۱]. عملکرد صوتی این لاینرها وابستگی زیادی به عمق سلول دارد. به منظور جذب فرکانس‌های پایین‌تر سلول‌های عمیق‌تری مورد نیاز است که همیشه امکان بکارگیری، به سبب محدودیت‌های طراحی مکانیکی، وجود ندارد. یک راه حل برای این مسئله، خم کردن سلول‌های لاینر می‌باشد، به طوریکه سلول‌های لاینر عمیق قابلیت نصب در فضاهای کم عمق را پیدا کنند که در این حالت به آنها لاینر حفره‌ای تاشو گفته می‌شود.

از معادله اخیر می‌توان نسبت دامنه‌ی موج بازتابی به انتشاری  $(B/A)$  را به صورت زیر بدست آورد:

$$\frac{B}{A} = \rho c \frac{\left(\frac{Z_n}{\rho c}\right) \cos\theta - 1}{\left(\frac{Z_n}{\rho c}\right) \cos\theta + 1}, \quad (7)$$

شدت صدا  $I$  به وسیله مولفه‌های عمود بر دیوار تعیین می‌شود. شدت موج انتشاری و بازتابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_i = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho c} |A|^2 \cos\theta, \quad (8)$$

$$I_r = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho c} |B|^2 \cos\theta. \quad (9)$$

ضریب جذب به صورت نسبت شدت موجی که بازتاب نشده به شدت موج انتشاری تعریف می‌شود که به صورت زیر است:

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - \left|\frac{B}{A}\right|^2. \quad (10)$$

با جایگذاری رابطه (۷) در (۹)، معادله محاسبه ضریب جذب برای موج صفحه‌ای با زاویه انتشار  $\theta$  به صورت زیر می‌شود:

$$\alpha(\theta) = \frac{4R \cos\theta}{(1 + R \cos\theta)^2 + (X \cos\theta)^2}. \quad (11)$$

### ۲-۲- ضریب جذب نرمال

در حالتی که موج صفحه‌ای در یک لوله با طول بی‌نهایت انتشار می‌یابد، می‌توان زاویه انتشار را صفر در نظر گرفت. این حالت خاص ضریب جذب نرمال نامیده می‌شود و با قرار دادن  $\theta=0$  در رابطه (۱۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\alpha(0) = \frac{4R}{(1 + R)^2 + (X)^2}, \quad (12)$$

### ۳-۲- انتشار میدان نفوذی

وقتی امواج آکوستیک فشاری از تمام جهات با مرز برخورد می‌کند، در این صورت انتشار میدان نفوذی به وجود می‌آید [۱۷]. ضریب جذب در چنین میدانی با انتگرال‌گیری از  $\alpha(\theta)$  برای تمامی زوایای انتشار ممکن به دست می‌آید و داریم:

$$\alpha_a = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin 2\theta \cdot d\theta, \quad (13)$$

$$\alpha_a = 8\Gamma \left( 1 - \Gamma \ln \left( \frac{R}{\Gamma} + 2R + 1 \right) + \left( \frac{X}{R} \right) \Gamma \left( \left( \frac{R}{X} \right)^2 - 1 \right) \arctan \left( \frac{X}{R+1} \right) \right) \quad (14)$$

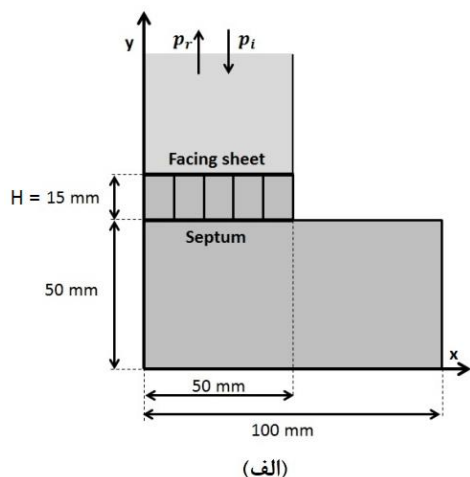
$$\Gamma = \frac{R}{R^2 + X^2}. \quad (15)$$

### ۴-۲- روابط تحلیلی

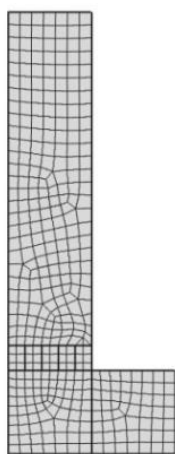
1. Perforated Plate
2. Porous Septum
3. Facing Sheet

### ۱-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی [۱۸] برای اعتبارسنجی نتایج ارائه شده‌اند. در کار تجربی آزمایشگاه NLR چهار میکروفون در چهار موقعیت مطابق شکل ۵ قرار داده شده و تست‌ها انجام شده‌اند. در تست‌هایی که در شرایط نبود دیواره متخلخل انجام شدند نیز میکروفون در موقعیت دیواره متخلخل حضور داشته است.

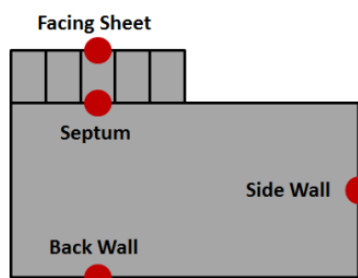


(الف)

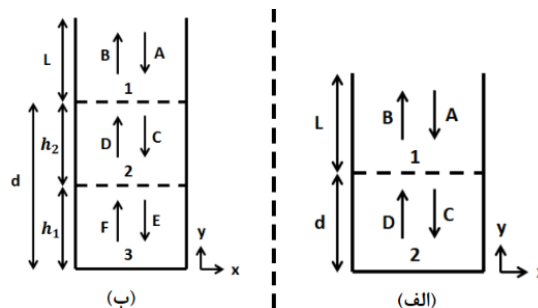


(ب)

شکل (۴): (الف) هندسه و (ب) نمونه‌ای از شبکه‌بندی لاینر حفره‌ای تاشو.



شکل (۵): موقعیت میکروفون‌ها در کار تجربی [۱۸].



شکل (۳): شماتیکی از حفره‌ی الف (SDOF) و ب (2DOF).

### ۳- هندسه مسئله و شبکه‌بندی

هندسه لاینر حفره‌ای تاشو در شکل ۴-الف نشان داده شده است. تعداد پنج سلول لانه زنبوری در گلوگاه لاینر واقع شده‌اند که هر کدام دارای عرض ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر هستند. کل دامنه لاینر حفره‌ای تاشو پر از هوا در نظر گرفته شده است و ورقه رویه و دیواره متخلخل مرزهای سخت صدا می‌باشند.

ورقه رویه در مرز مابین ستون هوا و گلوگاه در  $y = d$  قرار گرفته است (شکل ۴) و با امپدانس داخلی  $\rho c(R_{fs} + ikm_f)$  مدل‌سازی می‌شود. دیواره متخلخل در مرز مابین گلوگاه و حفره در  $y = d$  قرار گرفته است و با یک امپدانس داخلی با مقدار  $\rho c(R_{sep} + ikm_f)$  مدل‌سازی می‌شود. سلول‌های لانه زنبوری قرار گرفته در گلوگاه، با مرز سخت صوت مدل‌سازی می‌شوند. در ورودی یک موج صفحه‌ای تعریف می‌شود که از نوع میدان فشار انتشاری بوده و دامنه انتشار موج برابر  $p_0$  است.

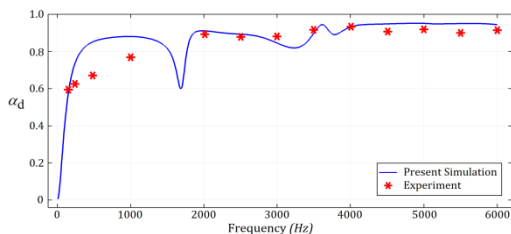
برای ایجاد شبکه‌بندی از المان‌های چهارضلعی با ماکزیمم اندازه ۸ میلی‌متر استفاده شده است که مطابق با وجود حداقل ۷ المان بر طول موج برای فرکانس‌های تا ۶ کیلوهرتز است (با در نظر گرفتن  $c = 343 \text{ m/s}$  و  $f = 6000 \text{ Hz}$ ، طول موج معادل  $\lambda = c/f = 57.2 \text{ mm}$  است). در شکل ۴-ب شبکه‌بندی قابل مشاهده است. نتایج برای بازه‌ی فرکانس ۱۰ تا ۶۰۰۰ Hz با گام افزایشی ۱۰ Hz استخراج شدند.

### ۴- بحث و بررسی نتایج

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی‌های عددی در حالت دو بعدی و با استفاده از نرم افزار المان محدود کامسول انجام شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی برای توزیع فشار با نتایج تجربی ارائه شده توسط آزمایشگاه NLR [۱۸] مقایسه شده‌اند. همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روابط تحلیلی مقایسه شده است و در ادامه تأثیر ارتفاع سلول‌های لانه زنبوری بر ضریب جذب صوت مورد بررسی قرار گرفته است.

## (علمی-پژوهشی)

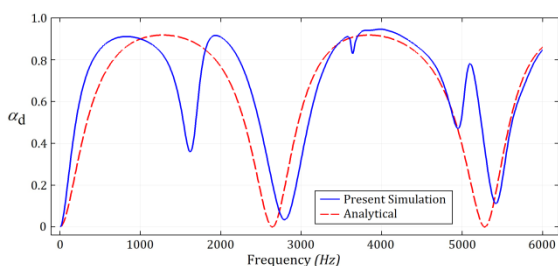
ایمان بهمن جهرمی و هادی دستورانی



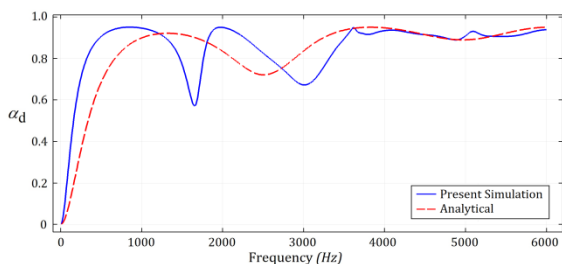
شکل (۸): ضریب جذب بر حسب فرکانس در شرایط وجود دیواره متخلخل با امپدانس  $pc(2.05 + 0.002ik)$

## ۲-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی

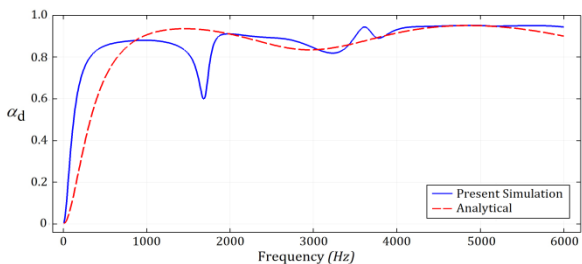
در این بخش نتایج شبیه‌سازی از نرم افزار کامسول با نتایج تحلیلی (روابط ارائه شده پیشین) مقایسه شده‌اند. شکل‌های ۹-۱۱ ضریب جذب به ترتیب برای سه حالت نبود دیواره متخلخل، دیواره با مقاومت کم و دیواره با مقاومت زیاد ارائه شده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی توافق قابل قبولی دارند.



شکل (۹): ضریب جذب بر حسب فرکانس در شرایط نبود دیواره متخلخل.



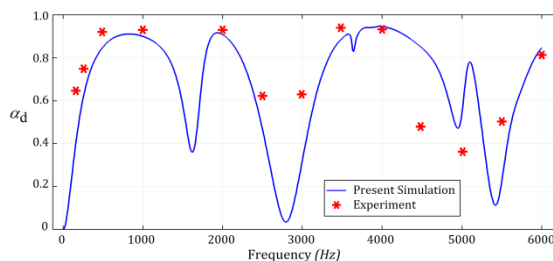
شکل (۱۰): ضریب جذب بر حسب فرکانس در شرایط وجود دیواره متخلخل با امپدانس  $pc(0.6 + 0.002ik)$



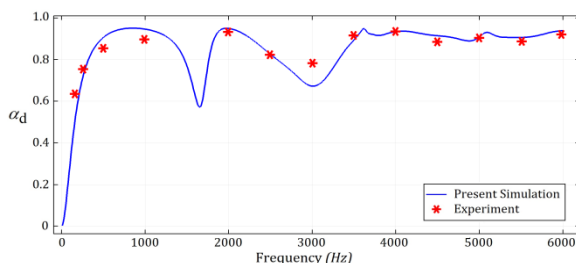
شکل (۱۱): ضریب جذب بر حسب فرکانس در شرایط وجود دیواره متخلخل با امپدانس  $pc(2.05 + 0.002ik)$

مقدار مقاومت ورقه رویه  $R_{fs}$  استفاده شده در تست‌های NLR معادل  $1.05\rho c$  اندازه‌گیری شده بود. مقاومت دیواره متخلخل در شرایط مقاومت کم معادل  $0.6\rho c$  و در شرایط مقاومت زیاد معادل  $2.05\rho c$  بودند. در نرم افزار کامسول همین مقادیر ذکر شده به کار گرفته شدند. بی‌حرکی جرمی (ورقه برابر مقدار ثابت  $0.02\text{ m}$  در نظر گرفته شد که بر اساس آن واکنش (بخش موهومی امپدانس) متغیر با فرکانس بوده و مطابق  $X = km_f$  بدست می‌آید.

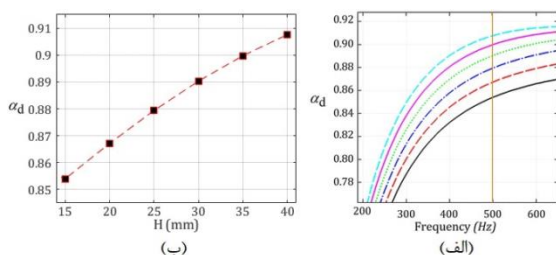
در شکل‌های ۸-۶ ضریب جذب بر حسب فرکانس از نتایج شبیه‌سازی کامسول در کنار نتایج تجربی [۱۸] ارائه شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در شرایط نبود دیواره متخلخل (لایتر یک درجه آزادی) نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی تفاوت کمی با هم دارند. با قرار دادن دیواره لایتر دو درجه آزادی (شکل‌های ۷ و ۸) تفاوت نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی کاهش می‌یابد. در مجموع توافق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تبدیل لایتر یک درجه آزادی به دو درجه آزادی (بدون تغییر هندسه کلی و تنها اضافه نمودن یک صفحه متخلخل) موجب بهبود قابل توجهی در ضریب جذب صوت می‌شود.



شکل (۶): ضریب جذب بر حسب فرکانس در شرایط نبود دیواره متخلخل.



شکل (۷): ضریب جذب بر حسب فرکانس در شرایط وجود دیواره متخلخل با امپدانس  $pc(0.6 + 0.002ik)$



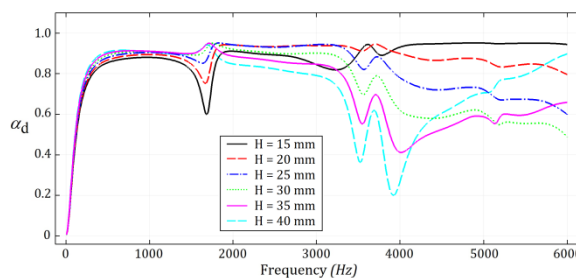
شکل (۱۳): (الف) بزرگنمایی از شکل ۱۲ و (ب) تغییرات ضریب جذب بر حسب ارتفاع لانه زنبوری در فرکانس  $500 \text{ Hz}$ .

### ۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، بررسی عددی به روش المان محدود بر روی یکی از رایج ترین لاینرهای آکوستیکی که در موتورهای توربوفن امروزی استفاده می شوند، انجام شد. نتایج در دو حالت لاینر یک درجه آزادی و لاینر دو درجه آزادی با نتایج تحلیلی و تجربی مقایسه شد. مشاهده شد که تبدیل لاینر یک درجه آزادی به دو درجه آزادی (بدون تغییر هندسه کلی و تنها اضافه نمودن یک صفحه متخلخل) موجب بهبود قابل توجهی در ضریب جذب صوت می شود. در این مقاله نشان داده شد که شبیه سازی عددی دو بعدی لاینر آکوستیکی نتایج قابل قبولی را به دست می دهد که در فاز طراحی لاینرهای آکوستیکی و بررسی پارامتری مسأله های مشابه می توان از آن استفاده کرد. همچنین، در بررسی تأثیر ارتفاع سلول های لانه زنبوری مشاهده شد افزایش این ارتفاع در فرکانس های پایین ( $f < 1700 \text{ Hz}$ ) موجب افزایش ضریب جذب و در فرکانس های بالا ( $f > 1800 \text{ Hz}$ ) موجب کاهش ضریب جذب صوت می شود. بر این اساس انتخاب مقدار مناسب برای ارتفاع سلول های لانه زنبوری برای داشتن ضریب جذب مناسب در طیف گسترده ای از فرکانس ها امر مهمی می باشد. برای لاینر حفره ای تاشوی در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، بر مبنای نتایج شبیه سازی ارتفاع  $20 \text{ mm}$  برای سلول های لانه زنبوری مناسب می باشد.

### ۳-۴- تأثیر ارتفاع سلول های لانه زنبوری

در این بخش با استفاده از شبیه سازی عددی تأثیر ارتفاع سلول های لانه زنبوری ( $H$  در شکل ۴-الف، فاصله بین ورقه رویه و صفحه متخلخل) بر میزان ضریب جذب مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۲ ضریب جذب صوت را برای ارتفاع های مختلف از سلول های لانه زنبوری نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود در فرکانس های زیر  $1700 \text{ Hz}$  افزایش ارتفاع سلول ها موجب افزایش و بهبود ضریب جذب جذب صوت می شود که جهت مشاهده بهتر در شکل ۱۳ یک بزرگنمایی از نواحی فرکانس پایین و نیز تغییرات ضریب جذب صوت بر حسب ارتفاع سلول های لانه زنبوری در فرکانس  $500 \text{ Hz}$  ارائه شده است. همچنین، در شکل ۱۲ مشاهده می شود پیک منفی که در بازه فرکانسی  $1800 < f < 1400 \text{ Hz}$  در ارتفاع سلول های  $15 \text{ mm}$  وجود دارد با افزایش ارتفاع سلول ها کاهش و به پیک مثبت در ارتفاع سلول های بالای  $35 \text{ mm}$  تبدیل می شود. نکته دیگر در شکل ۱۲ این است که در فرکانس های بالاتر از  $1700 \text{ Hz}$  افزایش ارتفاع سلول های لانه زنبوری موجب کاهش قابل توجه در ضریب جذب می شود. بر این اساس انتخاب مقدار مناسب برای ارتفاع سلول های لانه زنبوری برای داشتن ضریب جذب مناسب در طیف گسترده ای از فرکانس ها امر مهمی می باشد. برای لاینر حفره ای تاشوی در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، بر مبنای نتایج شبیه سازی در شکل ۱۲، ارتفاع  $20 \text{ mm}$  برای سلول های لانه زنبوری مناسب می باشد.



شکل (۱۲): تأثیر ارتفاع سلول های لانه زنبور بر ضریب جذب صوت.

## ۶- مراجع

- [1] Motsinger, R., and Kraft, R., *Design and Performance of Duct Acoustic Treatment*, Hampton, Virginia, 1991.
- [2] Astley, R.J., *Propulsion System Noise: Turbomachinery*, in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, John Wiley & Sons, 2010.
- [3] Sugimoto, R., Murray, P., and Astley, R.J., "Folded Cavity Liners for Turbofan Engine Intakes", *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs*, 2012.
- [4] Sugimoto, R., Astley, J., and Murray, P., "Computational Analysis of Folded Cavity Liners for Turbofan Intakes", *The INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference, Institute of Noise Control Engineering, Osaka*, 2011.
- [5] Astley, R.J., "Numerical Methods for Noise Propagation in Moving Flows, With Application to Turbofan Engines", *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 30, pp. 227-239, 2009.
- [6] Konopka, W., Pawlaczyk-Łuszczczyńska, M., and Śliwińska-Kowalska, M., "The Influence of Jet Engine Noise on Hearing of Technical Staff", *Med Pr*, Vol. 65, No. 5, pp. 583-592, 2014.
- [7] Ishii, T., Nagai, K., Oinuma, H., Oishi, T., and Ishii, Y., "Jet Noise Reduction of Turbofan Engine by Notched Nozzle", *The INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference, Spain*, 2019.
- [8] Smith, M.J., *Aircraft noise*, Cambridge University Press, 2004.
- [9] Bertolucci, B.L., *An Experimental Investigation of the Grazing Flow Impedance Duct at the University of Florida for Acoustic Liner Applications*, University of Florida, 2012.
- [10] Sutliff, D.L., Jones, M.G., and Hartley, T.C., "High-Speed Turbofan Noise Reduction Using Foam Metal Liner over the Rotor", *Journal of aircraft*, Vol. 50, No. 5, pp. 1491-1503, 2013.
- [11] Casalino, D., Hazir, A., and Mann, A., "Turbofan Broadband Noise Prediction Using the Lattice Boltzmann Method", *AIAA Journal*, Vol. 56, No. 2, pp. 609-628, 2018.
- [12] Abdollahipour, S., and Shams Taleghani, A., "New Technologies for Noise Reduction in Aircraft Engines", *Iranian Journal of Mechanical Engineers*, Vol. 25, No. 119, pp. 19-26, 2016 (In Persian).
- [13] Amian, M., Golrang, S., and Zakeri, R., "Turbofan Broadband Noise Prediction Using the Lattice Boltzmann Method", *Iranian Journal of Mechanical Engineers*, Vol. 25, No. 111, pp. 31-38, 2016 (In Persian).
- [14] Chambers, A.T., Manimala, J.M., and Jones, M.G., "Design and Optimization of 3D Folded-Core Acoustic Liners for Enhanced Low-Frequency Performance", *AIAA Journal*, Vol. 58, No. 1, pp. 206-218, 2020.
- [15] Ma, X., and Su, Z., "Development of Acoustic Liner in Aero Engine: A Review", *Science China Technological Sciences*, pp. 1-14, 2020.
- [16] Crocker, M.J., *Handbook of Acoustics*, John Wiley & Sons., New York, USA, 1998.
- [17] Fahy, F., *Foundations of Engineering Acoustics*, ACADEMIC PRESS, London, UK, 2001.
- [18] Knepper, K., *Numerical Predictions of Acoustic Performance of Folded Cavity Liners for Turbofan Engine Intakes*, Rolls-Royce University Technology Centre in Gas Turbine Noise, Institute of Sound and Vibration Research, Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, UK, 2013.