

# بررسی اثرات عایق‌های صدا در رفتار صوتی محفظه کابین یک خودروی سواری با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری

روح الله طالبی توئی<sup>\*</sup>، امیر محمد چوداری خامنه

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

## چکیده

در این مقاله، استفاده از عایق‌های صدا در رفتار صوتی محفظه کابین یک خودروی سواری، با کمک یک شبیه‌ساز مهندسی و بر پایه‌ی روش تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای) مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا معادلات حاکم بر روش تحلیل انرژی آماری استخراج شدند. سپس، تمامی زیرساخت‌های مشتمل بر محفظه‌های صوتی محیط داخل و خارج بدنه خودرو و همچنین اتصالات بین آن‌ها الگوسازی شدند. با احتساب تمامی منابع صوتی در الگو، اثرات استفاده از مواد متخلخل بر میزان افت تراگسیل صدا در اجزاء اصلی بدنه خودرو از جمله پنل سقف، پنل کف خودرو و پنل داشبورد، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج اعتبارسنجی، دقت و صحت الگوی حاضر را نشان می‌دهند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از عایق‌های متخلخل صدا، سبب بهبود نوفه به محفظه‌ی کابین خودرو به خصوص در بسامدهای بالا می‌گرددند. از طرف دیگر، نشان می‌دهند که تأثیر استفاده از این مواد در پنل سقف بیشتر از دیگر قسمت‌های خودرو می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای)، تراگسیل صدا، لایه متخلخل، عایق صدا.

مراحل بهینه‌سازی طراحی صورت گیرد و یا اینکه بر روی الگوی واقعی سامانه به منظور ارزیابی مشخصات آن و یا تشخیص یک عیب انجام پذیرد [۱]. الگوی اس‌ای‌ای می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی برای تشخیص این که چه چیزی باید اندازه‌گیری شود و چگونه نتایج آزمون‌ها را باید تفسیر نمود، به کار گرفته شود. در سال‌های اخیر علاقه خاصی به روش اس‌ای‌ای در صنعت خودروسازی مشاهده شده است، زیرا به وسیله این روش می‌توان تراز فشار صوتی و ارتعاشات در بسامدهای بالا را توسط معادلات اس‌ای‌ای تحلیل نمود. در واقع این روش یک ابزار طراحی برای صنعت خودروسازی برای رسیدن به کیفیت بالا و کاهش زمان طراحی برای خودروهای مدرن و بدون سر و صدا می‌باشد.

مطالعات گستردۀای در رابطه با تراگسیل صوتی در پوسته‌ها و ورق‌های تک‌جداره، دوجداره با لایه‌ی میانی هوا و دوجداره با لایه‌ی میانی متخلخل صورت پذیرفته است، که هریک سعی در بهبود مطالعه‌ی قبلی و ارائه نتایج دقیق‌تر دارند. اولین مطالعه در زمینه تراگسیل نوفه (نویز) از سازه‌های منحنی شکل توسط اسمیت انجام شد

## ۱. مقدمه

پیش‌بینی ضربی افت تراگسیل (تی‌ال)<sup>۱</sup> صوتی در گذر صوتی از یک دیواره یا سامانه‌ای که متشکل از چندین لایه باشد، در بسیاری از صنایع نظیر اتومبیل‌سازی، هواپیماسازی، ساختمان‌سازی و نیز عایق‌های صوتی کاربرد گسترده‌ای دارد.

در روش تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای)<sup>۲</sup>، تخمین‌های کمی و کیفی از رفتار دینامیکی سامانه به تحریکات خارجی بسته می‌آید. از الگوی اس‌ای‌ای می‌توان به منظور مشخص نمودن مسیرهای اصلی انتقال انرژی به مکان‌های پاسخ بحرانی استفاده نمود [۱]. این اطلاعات بسیار مفید می‌باشند که می‌توان براساس آن با تغییر طرح، نقش عمدۀای در بهبود عملکرد ارتعاشاتی و صوتی سامانه ایفا نمود. روش تحلیل آماری انرژی یک ابزار بسیار مفید و سودمند برای انجام آزمایش‌هایی بر روی یک سامانه می‌باشد. این امر می‌تواند بر روی یک نمونه در طی

\* نویسنده پاسخگو: rtalebi@iust.ac.ir

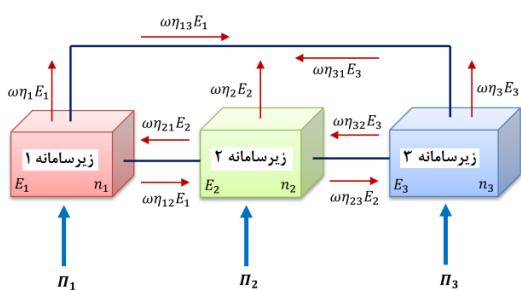
<sup>۱</sup> TL; Transmission Loss

<sup>۲</sup> SEA

پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی دوجداره را با استفاده از روش فضای حالت بررسی نمودند [۱۶]. در این مقاله ابتدا به معروفی روش تحلیل آماری انرژی (اس‌ای‌ی‌ای) و معادلات حاکم بر آن پرداخته می‌شود. سپس تمامی زیرسامانه‌ها، محفظه‌های صوتی و اتصالات بین اجزای محفظه‌ی کابین خودرو در شبیه‌ساز مهندسی الگوسازی می‌گردند. در ادامه تمامی منابع نوفه (نویز) هوابرد و سازه‌برد به الگو اعمال شده و الگو توسط شبیه‌ساز تحت تحلیل قرار می‌گیرد. علاوه بر این، اثرات استفاده از پنل ساندویچی دوجداره با لایه‌ی میانی متخلخل در پنل سقف، پنل کف و داشبورد خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. محاسبه ضریب افت تراگسیل صوتی یک پنل دوجداره با استفاده از روش اس‌ای‌ی‌ای

در الگوسازی سامانه فوق به روش اس‌ای‌ی‌ای، سامانه مذکور شامل سه زیرسامانه می‌باشد. زیرسامانه اول، منبع صوتی (چشمء صوتی)، زیرسامانه دوم پنل دوجداره و زیرسامانه سوم، محیط دریافت‌کننده می‌باشد و تنها زیرسامانه اول است که تحت تأثیر منبع صوتی خارجی قرار می‌گیرد. شکل ۱، طرح‌واره جریان انرژی بین زیرسامانه‌های موجود در الگوی اس‌ای‌ی‌ای مسئله مورد نظر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱ نمایش طرح‌واره جریان انرژی بین زیرسامانه‌ها.

در حالت کلی معادلات بالانس توان (تعادل توان) در حالت پایا برای این سه زیرسامانه به صورت زیر خواهند شد [۱]:

$$\Pi_{i,in} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Pi_{j \rightarrow i} - \Pi_{i,diss} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Pi_{i \rightarrow j} = 0. \quad (1)$$

[۲]. او در مطالعه‌ی خود انرژی جذب شده توسط سازه را به عنوان افت تراگسیل صدا، و به صورت نسبت کسری توان جذب شده به توان برخورده در طول پوسته معرفی نمود. در ادامه، اینگارد کار اسمیت را گسترش داده و مقدار تراگسیل صوتی در پوسته‌های استوانه‌ای را با در نظر گرفتن امواج انعکاسی به دست آورد [۳]. کوال بلیس تراگسیل صوتی در پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک را با در نظر گرفتن میدان جابجایی سه-بعدی بررسی نمود [۴]. مطالعه‌ی تراگسیل صوتی در پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای لانه زنبوری تحت برخورد موج صفحه‌ای، توسط تانگ انجام شد [۶]. لی و کیم تراگسیل صوتی از یک پوسته‌ی استوانه‌ای دوجداره‌ی همسانگرد (ایزوتروپیک) را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مطالعه نمودند [۷]. داشجو و همکارانش، تراگسیل صوتی از یک پوسته‌ی استوانه‌ای ارتوتروپویک را با استفاده از نظریه کلاسیک بررسی نمودند [۸]. روش الگوی کامل برای مطالعه‌ی تراگسیل صوتی از یک پنل ساندویچی با لایه‌ی میانی متخلخل توسط بولتون معرفی شد [۹]. او این مطالعه را برای سه ساختار مختلف پوسته مورد ارزیابی قرار داد. در ادامه روش ساده‌سازی شده توسط لی و همکارانش، برای محاسبه‌ی تراگسیل صوتی در پوسته‌ی استوانه‌ای با لایه‌ی میانی متخلخل معرفی شد [۱۰]. طالبی و همکاران، تراگسیل صوتی از پنل دوجداره‌ی کامپوزیتی با لایه‌ی میانی متخلخل را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. زو و همکاران تراگسیل صوتی از پوسته‌های استوانه‌ای با لایه‌ی میانی متخلخل را برای سه ساختار مختلف به دست آورند [۱۲]. در ادامه لیو و همکاران اشکالات موجود در مطالعه‌ی زو را نشان داده و نتایج صحیح را رائه نمودند [۱۳]. همچنین لیو و همکاران در مطالعه‌ی دیگری تراگسیل صوتی از پوسته‌های استوانه‌ای با لایه‌ی میانی متخلخل را با در نظر گرفتن جریان داخلی بررسی نمودند [۱۴]. اخیراً طالبی و همکاران، روش الگوی کامل توسعه یافته را به منظور بررسی تراگسیل صوتی در پوسته‌ی استوانه‌ای متخلخل ارائه نمودند [۱۵]. همچنین طالبی و همکاران در مطالعه‌ی دیگری تراگسیل صوتی در

$$E_r \omega \eta_r + \omega \eta_{r1} n_r \left\{ \frac{E_r}{n_r} - \frac{E_1}{n_1} \right\} + \omega \eta_{rr} n_r \left\{ \frac{E_r}{n_r} - \frac{E_r}{n_r} \right\} = .$$

$$E_r \omega \eta_r + \omega \eta_{1r} n_r \left\{ \frac{E_1}{n_1} - \frac{E_r}{n_r} \right\} + \omega \eta_{rr} n_r \left\{ \frac{E_1}{n_1} - \frac{E_r}{n_r} \right\} = .$$

از معادله ۸ و با بکارگیری رابطه‌ی اثر متقابل متناظر، داریم:

$$\frac{E_r}{n_r} = \frac{\eta_{r1} \left( \frac{E_1}{n_1} \right) + \eta_{rr} \left( \frac{E_r}{n_r} \right)}{\eta_r + \eta_{r1} + \eta_{rr}} \quad (9)$$

از آنجا که سطوح فشار صوتی در محیط منبع (زیرسامانه اول) به طور قابل توجهی از سطوح فشار صوتی در محیط گیرنده (زیرسامانه سوم) بزرگ‌تر است  $E_r/n_r \ll (E_1/n_1)$  می‌توان از مقدار  $E_r/n_r$  در مقابل بزرگی مقدار  $E_1/n_1$  صرف‌نظر کرد و نیز از آنجا که زیرسامانه‌های مذکور در اتصال با یکدیگر می‌باشند، داریم [۱]:

$$\eta_{r1} = \eta_{rr} = \eta_{rad} = \frac{\rho c \sigma_{rad}}{\rho_s \omega} \quad (10)$$

$$\eta_r = \eta_s \quad (11)$$

که در آن  $\eta_{rad}$  ضریب اتلاف تشعشع صوتی دیواره،  $\eta_s$  ضریب اتلاف سازه،  $\sigma_{rad}$  راندمان تشعشع دیواره،  $\rho_s$  چگالی سیال،  $c$  سرعت صوتی و  $\omega$  بسامد مرکزی باند هستند.

از آنجا که محیط منبع به صورت محیط پرزاک فرض شده، لذا انرژی ذخیره شده در آن و توان ورودی به آن برابر خواهد بود با [۱]:

$$E_1 = P_1 V_1 / \rho c \quad (12)$$

$$P_1 = \frac{P_{inc}}{4 \rho c} A_p \quad (13)$$

بطوریکه  $P_1$  و  $V_1$  به ترتیب فشار و حجم اتاق منبع و  $A_p$  مساحت سطح مشترک دیواره و محیط منبع می‌باشند. انرژی مکانیکی ذخیره شده در پنل با توجه به سرعت و جرم آن برابر است با:

$$E_r = < v^2 > \rho_s A_p \quad (14)$$

در معادلات فوق،  $\Pi_{i,diss}$ ، توان اتلافی در سامانه-i و  $\Pi_{ij}$  توان تراگسیلی از زیرسامانه-i-ام به زیرسامانه-j-ام می‌باشند، که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Pi_{i,diss} = \omega \eta_i E_i \quad , \quad \Pi_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i \quad (2)$$

معادله‌ی ۱ را می‌توان برای هر سه زیرسامانه به صورت جداگانه بازنویسی نمود که با جای‌گذاری معادله‌ی ۲ در آن‌ها، معادلات زیر استخراج می‌گردد:

$$\begin{aligned} E_r \omega \eta_{21} + E_r \omega \eta_{31} - E_1 \omega \eta_{12} - E_1 \omega \eta_{11} \\ - E_1 \omega \eta_{13} + \Pi_1 = . \\ E_1 \omega \eta_{12} + E_r \omega \eta_{22} - E_r \omega \eta_{21} - E_r \omega \eta_{22} \\ - E_r \omega \eta_r + \Pi_r = . \\ E_1 \omega \eta_{13} + E_r \omega \eta_{23} - E_r \omega \eta_{21} - E_r \omega \eta_{22} \\ - E_r \omega \eta_r + \Pi_r = . \end{aligned} \quad (3)$$

حال معادلات فوق به فرم ماتریسی و به شکل زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} \omega \eta_{12} + \omega \eta_{13} + \omega \eta_{11} & -\omega \eta_{21} & -\omega \eta_{31} \\ -\omega \eta_{12} & \omega \eta_{21} + \omega \eta_{23} + \omega \eta_{22} & -\omega \eta_{22} \\ -\omega \eta_{13} & -\omega \eta_{23} & \omega \eta_{31} + \omega \eta_{32} + \omega \eta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_r \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_r \\ \Pi_2 \end{bmatrix} \rightarrow [A][E] = [\Pi] \quad (4)$$

بنابراین رابطه متقابل میان هر دو زیرسامانه را به طور جداگانه می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱]:

$$\begin{aligned} \text{رابطه‌ی اثر متقابل میان دو زیرسامانه اول و دوم:} \\ n_1 \eta_{12} = n_2 \eta_{21} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{رابطه‌ی اثر متقابل میان دو زیرسامانه دوم و سوم:} \\ n_2 \eta_{23} = n_3 \eta_{32} \quad (6) \end{aligned}$$

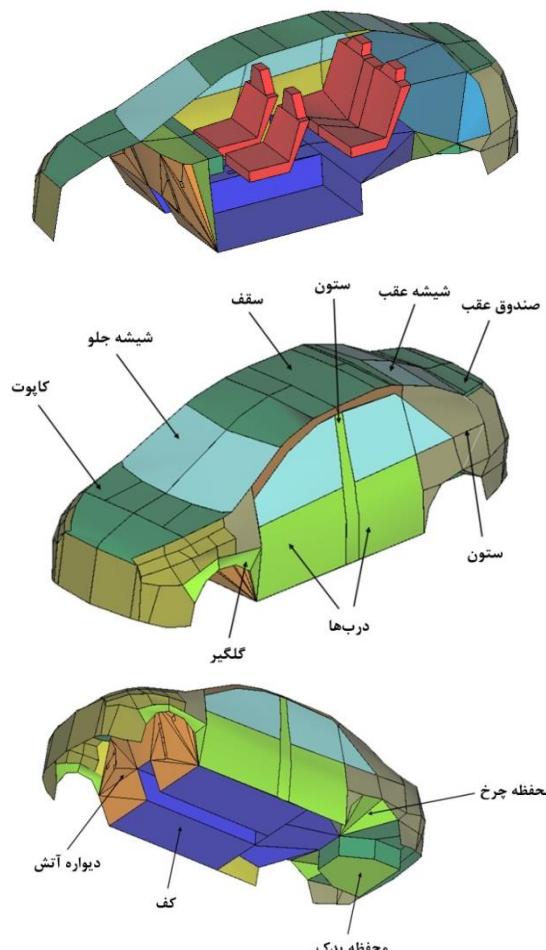
$$\begin{aligned} \text{رابطه‌ی اثر متقابل میان دو زیرسامانه اول و سوم:} \\ n_1 \eta_{13} = n_3 \eta_{31} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{که در آن } n_1 \text{ و } n_2 \text{ چگالی مودال اتاق‌های اول و سوم؛} \\ n_3 \text{ چگالی مودال پنل می‌باشد.} \end{aligned}$$

حال با جای‌گذاری معادلات فوق در معادله‌ی ۳ معادلات زیر استخراج می‌گردد:

$$\begin{aligned} E_1 \omega \eta_1 + \omega \eta_{12} n_1 \left\{ \frac{E_1}{n_1} - \frac{E_r}{n_r} \right\} \\ + \omega \eta_{13} n_1 \left\{ \frac{E_1}{n_1} - \frac{E_r}{n_r} \right\} \\ = \Pi_1 \end{aligned} \quad (8)$$

صوتی مورد نیاز جهت تحلیل الگوی خودرو را ایجاد نمود. باید به این نکته توجه نمود که الگوی عنصر متناهی خودرو مشتمل بر بیش از ۵۰۰۰ عنصر می‌باشد، حال آنکه برای تحلیل این الگو به روش تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای)، بایستی تنها اجزای مورد نیاز و مهم را که طبیعتاً تعدادشان کمتر از عناصر الگوی عنصر متناهی می‌باشد، به صورت زیرسامانه ایجاد نمود. الگوی تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای) خودروی مذکور شامل ۳۰۰ زیرسامانه سازه‌ای و ۱۰۰ زیرسامانه صوتی می‌باشد. شکل ۲، طراحی داخلی خودرو، طراحی خارجی خودرو و زیرسامانه‌های سازه‌ای اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ طراحی داخلی و خارجی خودرو و زیرسامانه‌های سازه‌ای اصلی الگوی اس‌ای‌ای خودرو.

زیرسامانه‌های صوتی این الگو به دو دسته، محفظه‌های صوتی محیط داخل و خارج کابین خودرو، تقسیم

که در آن  $\rho_s$  چگالی پبل می‌باشد. هم‌چنین:

$$\langle v^2 \rangle = \frac{n_r}{n_1} \cdot \frac{\eta_{rad}}{2\eta_{rad} + \eta_r} \cdot \frac{V_1}{\rho_s A_p} \cdot \frac{P_1^2}{\rho c^2} \quad (15)$$

بنابراین توان تراگسیل یافته از زیرسامانه ۲ به اتاق گیرنده (زیرسامانه ۳) برابر خواهد شد با:

$$\Pi_{13} = \rho c A_p \sigma_{rad} \langle v^2 \rangle = \frac{n_r}{n_1} \cdot \frac{\eta_{rad}}{2\eta_{rad} + \eta_r} \cdot \frac{V_1}{\rho_s} \cdot \frac{P_1^2}{c} \sigma_{rad} \quad (16)$$

توان تراگسیل یافته از اتاق متبع (زیرسامانه ۱) به اتاق گیرنده (زیرسامانه ۳) از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$\Pi_{12} = \omega \eta_{12} E_1 \quad (17)$$

با توجه به تعریف ضریب عبور  $\tau$  و استفاده از روابط بالا خواهیم داشت [۱]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\Pi_{inc}}{\Pi_{12} + \Pi_{13}} \quad (18)$$

در نهایت مقدار ضریب افت تراگسیل صوتی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱]:

$$TL = 10 \log(1/\tau) \quad (19)$$

### ۳. الگوسازی و شبیه‌سازی

در این بخش، نحوه الگوسازی بدنه خودروی سواری جهت تحلیل و محاسبه تراگسیل صوتی داخل کابین خودرو با فرض اعمال منابع اصلی نوفه (نویز) هوابرد در خودرو به عنوان تحрیکات ورودی به الگو، توسط نرم‌افزار وی‌ای-وان<sup>۱</sup> تشریح می‌گردد. منابع اصلی نوفه هوابرد شامل نوفه موتور، نوفه آبرودینامیکی و نوفه تایر / جاده هستند.

برای ساخت الگوی سه‌بعدی این خودرو، ابتدا بایستی مختصات  $x$ ،  $y$  و  $z$  تک تک نقاط الگو را به نرم‌افزار معرفی و یا الگوی اف‌ای‌ای (عنصر متناهی)<sup>۲</sup> خودرو را از سایر نرم‌افزار کد<sup>۳</sup> از قبیل: کتیا<sup>۴</sup>، سالیدورکز<sup>۵</sup> و ... وارد نمود. پس از وارد کردن الگو و تعریف کلیه مواد و خواص فیزیکی مورد نیاز، بایستی کلیه زیرسامانه‌های سازه‌ای و

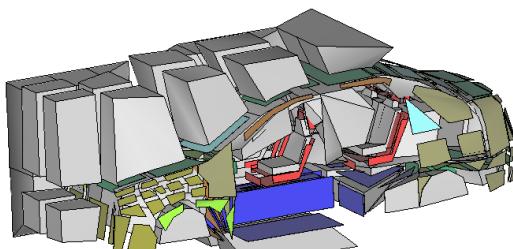
<sup>1</sup> VA-One

<sup>2</sup> FE

<sup>3</sup> CAD

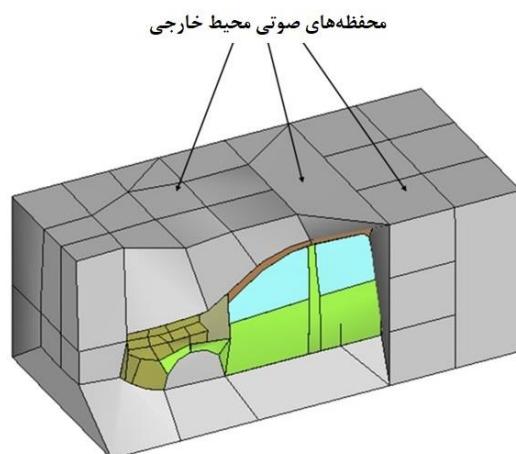
<sup>4</sup> Catia

<sup>5</sup> Solidworks

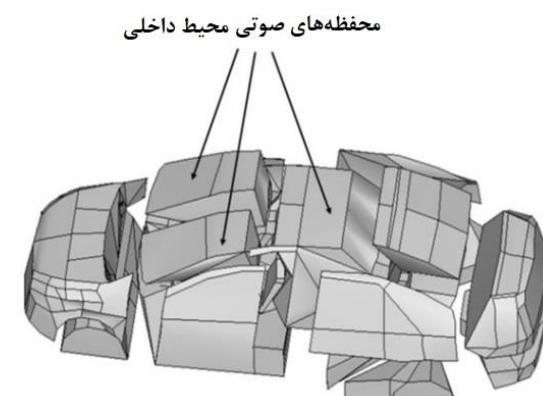


شکل ۵ الگوی کامل اس‌ای‌ای ایجاد شده از خودرو در نرمافزار وی‌ای-وان.

می‌شوند. که به ترتیب، شکل‌های ۳ و ۴ تعدادی از زیرسامانه‌های صوتی الگوی اس‌ای‌ای خودرو را نشان می‌دهند.



شکل ۳ تعدادی از زیرسامانه‌های صوتی خارج کابین خودرو در الگوی اس‌ای‌ای.

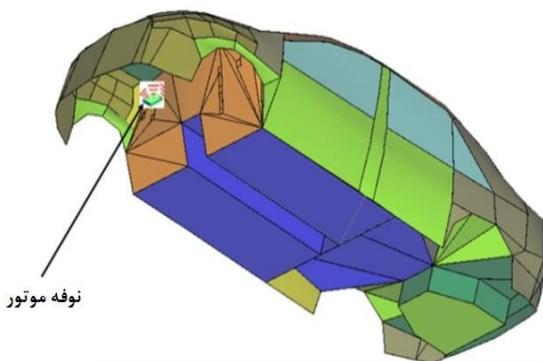


شکل ۴ تعدادی از زیرسامانه‌های صوتی فضای داخل کابین خودرو در الگوی اس‌ای‌ای.

در آزمون‌های آزمایشگاهی که بر روی خودروها جهت محاسبه افت تراگسیل صوت داخل کابین صورت می‌گیرد، فضای داخل خودرو به صورت بدون انعکاس در نظر گرفته می‌شود، لذا در اینجا نیز به جهت محاسبه افت تراگسیل صدا در داخل کابین خودرو، کلیه محفظه‌های صوتی داخل کابین خودرو به صورت بدون انعکاس فرض شده‌اند. شکل ۵، کلیه زیرسامانه‌های سازه‌ای و صوتی الگوی اس‌ای‌ای خودرو را به‌طور همزمان نمایش می‌دهد.

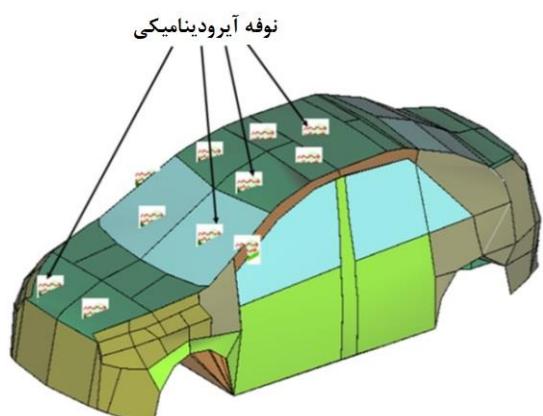
**۵. وارد کردن منابع نویفه خودرو به الگوی اس‌ای‌ای**  
به‌طور کلی منابع صوتی توسط امواج هوایبرد و سازه‌برد می‌توانند در یک سازه تراگسیل کنند. غالباً یک بلندگو و یا مرتعش کننده مکانیکی به عنوان منبع صوتی هوایبرد و یا سازه‌برد مورد استفاده قرار می‌گیرد. بلندگوها می‌توانند در مکان‌های مختلفی تعییه شوند تا توزیع منابع صوتی واقعی در خودرو را شبیه‌سازی نمایند. برای مثال، تعدادی از بلندگوها می‌توانند در محل محفظه موتور جهت شبیه‌سازی صدای حاصل از موتور خودرو تعییه گردند. همچنین بلندگوها را می‌توان در اطراف یک خودرو قرار داد تا صدای حاصل از تایپرها و یا صدای اگزوز را الگویی نمایند. منابع صوتی هوایبرد هم در یک میدان پراکنده

<sup>۱</sup> Junction



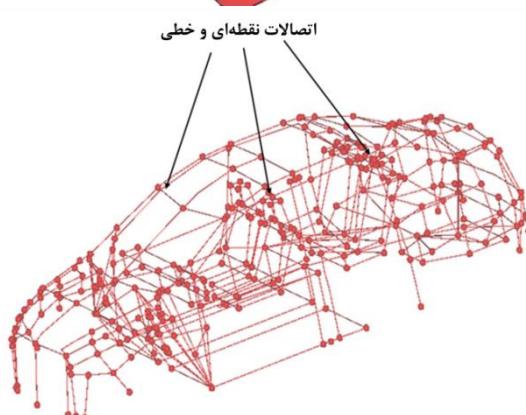
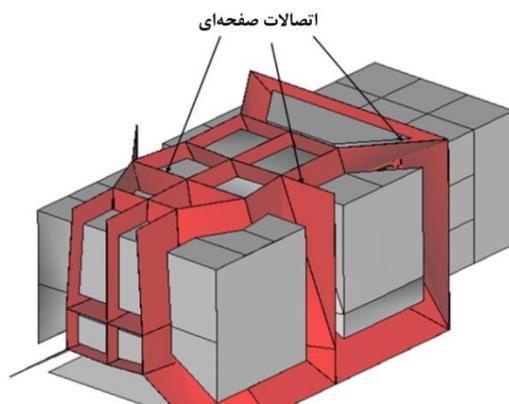
شکل ۸ نحوه‌ی الگوسازی نوفه موتور در الگوی اس‌ای‌ای خودرو.

منبع نوفه آیرودینامیکی نیز مطابق شکل ۹، به صورت جریان لایه مرزی توربولانٹ<sup>۲</sup> جهت شبیه‌سازی فشارهای نوسانی بر روی سطح خارجی اجزای اصلی بدن خودرو از جمله درب موتور، شیشه جلو، ستون اول خودرو و پنل سقف در نظر گرفته شده‌اند.

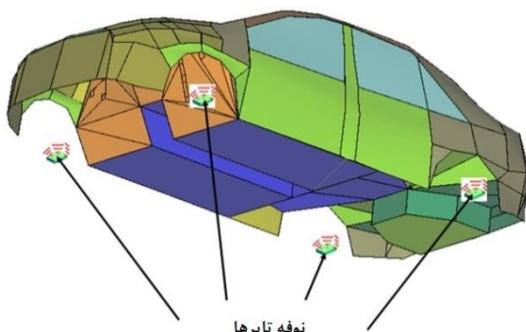


شکل ۹ نحوه‌ی الگوسازی نوفه آیرودینامیکی در الگوی اس‌ای‌ای خودرو.

**۶. نتایج تحلیل الگوی اس‌ای‌ای خودرو**  
به جهت اعتبارسنجی، لازم است تا روش مورد استفاده در این مقاله با نتایج محققان گذشته مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور و به جهت نشان دادن صحت روش اس‌ای‌ای، مطابق شکل ۱۰، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش اس‌ای‌ای و نتایج آزمایشگاهی انجام شده در منبع [۹]، برای یک پیل دوجداره متخالخل صورت پذیرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاف ناچیزی بین نتایج روش اس‌ای‌ای با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد



شکل ۶ اتصالات بین زیرسامانه‌ها در الگوی اس‌ای‌ای خودرو.



شکل ۷ نحوه‌ی الگوسازی نوفه تایر/جاده در الگوی اس‌ای‌ای خودرو.

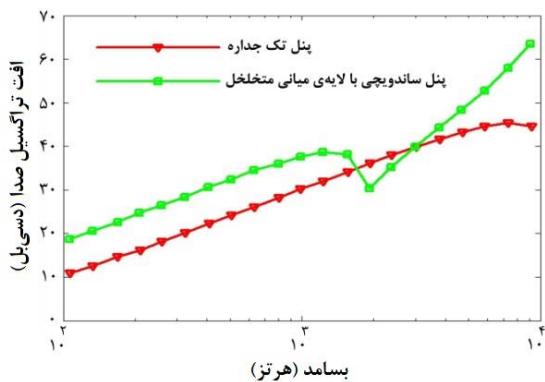
صوتی<sup>۱</sup> و هم در یک میدان آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرند و به طور مؤثری در آزمون‌ها شبیه‌سازی می‌گردند. در الگوی مذکور نوفه (نویز) تایر/جاده و نوفه موtor مطابق شکل‌های ۷ و ۸ به صورت میدان پراکنده صوتی الگوسازی شده‌اند، که به ترتیب در محل نصب موtor و چرخ‌ها به الگوی اس‌ای‌ای اعمال می‌شوند. تحریک

<sup>2</sup> Turbulent boundary layer<sup>1</sup> Diffuse acoustic field

جدول ۱ مشخصات ترکیبات مختلف برای پنل سقف خودرو.

ضخامت هر لایه بر حسب میلی‌متر		پیکربندی پنل سقف خودرو
الیاف شیشه	فولاد	
---	۱	۱
۵	۱	۲

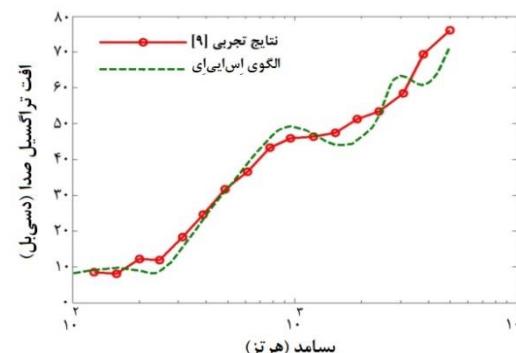
شکل ۱۱، نمودار افت تراگسیل صدا داخل کابین خودرو، حاصل از به کارگیری هر یک از این دو حالت را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در اکثر محدوده بسامدی، استفاده از پنل‌های ساندویچی با لایه متخلخل عملکرد بسیار مناسب‌تری (در حدود ۲۰ دسی‌بل در بسامدهای بالا) در افت تراگسیل صدا نسبت به پنل‌های تک‌جداره دارند. از طرف دیگر، استفاده از لایه متخلخل بسامد بحرانی سازه را کاهش می‌دهد. بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، ضریب افت تراگسیل صدا در بسامد بحرانی سازه، کوچک‌تر از پنل تک‌جداره می‌گردد. همچنین استفاده از مواد جاذب متخلخل سبب افزایش درصدی افت تراگسیل صدا در پنل سقف خودرو ۴۷/۵۸ می‌گردد.



شکل ۱۱ افت تراگسیل صدای داخل کابین خودرو حاصل از پنل متخلخل سقف خودرو.

شکل ۱۲، افت تراگسیل صدای داخل کابین خودرو، حاصل از به کارگیری دو ترکیب مختلف برای پنل کف خودرو، را نمایش می‌دهد. مشخصات مربوط به این دو در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که مشخص است، استفاده از پنل ساندویچی با لایه‌ی میانی متخلخل در پنل کف خودرو نیز سبب بهبود افت تراگسیل صدا در داخل کابین خودرو به خصوص در محدوده بسامدی بالا

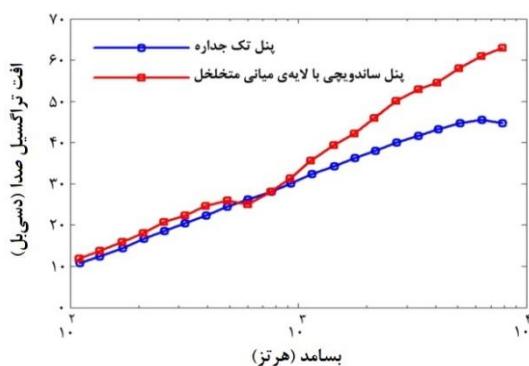
که بر دقت قابل قبول روش اس‌ای‌ای صحه‌گذاری می‌نماید.



شکل ۱۰ مقایسه روش اس‌ای‌ای با نتایج آزمایشگاهی.

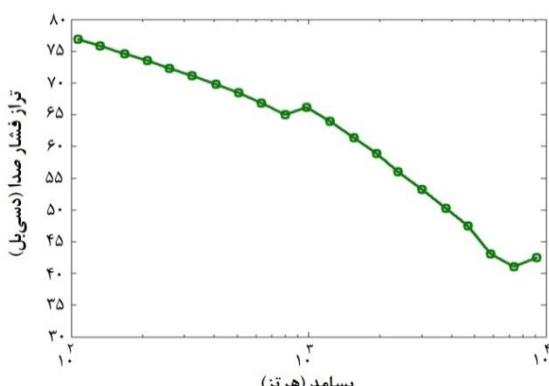
در ادامه پس از شبیه‌سازی کامل الگوی اس‌ای‌ای کابین خودرو و اعمال منابع نوافه به آن، ابتدا پارامترهای سامانه محاسبه و سپس با توجه به کاربرد مواد متخلخل در قسمت‌های مختلف بدنه خودرو، ابتدا افت تراگسیل صدا هر یک از این سه جزء اصلی را در دو حالت قبل و بعد از اعمال پنل‌های ساندویچی متخلخل به آن‌ها مورد بررسی قرار می‌دهند تا از طریق مقایسه افت تراگسیل آن‌ها میزان تأثیر استفاده از این پنل‌ها مشخص گردد. همچنین با اعمال نوافه (نویز) آیرودینامیکی به الگوی اس‌ای‌ای خودرو و بررسی مجموع توانهای ورودی به محفظه صوتی مربوط به راننده، مسیرهای اصلی تراگسیل نوافه به داخل کابین خودرو شناسایی می‌گرددند. در انتهای نیز تراز صوتی ورودی به داخل کابین خودرو محاسبه و با استاندارد ای‌ای‌آرسی-۱۰۸-۱ (۶۷.۴ دسی‌بل) مقایسه می‌گرددند. ضمناً کلیه تحلیل‌ها در بازه بسامدی ۱۰۰ الی ۱۰۰۰۰ هرتز و بر اساس باند ۱/۳ اکتاو انجام می‌شوند. در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل صوتی پنل سقف، کف خودرو و پنل داشبورد خودرو، ارائه می‌گردد.

مطلوب جدول ۱، دو حالت با و بدون ماده متخلخل جهت تحلیل صوتی پنل سقف خودرو، در نظر گرفته شده است. در حالت اولیه، ضخامت پنل‌های خودرو ۱ میلی‌متر و از جنس فولاد در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۳ افت تراگسیل صدای داخل کابین خودرو حاصل از پنل متخلخل داشبورد خودرو.

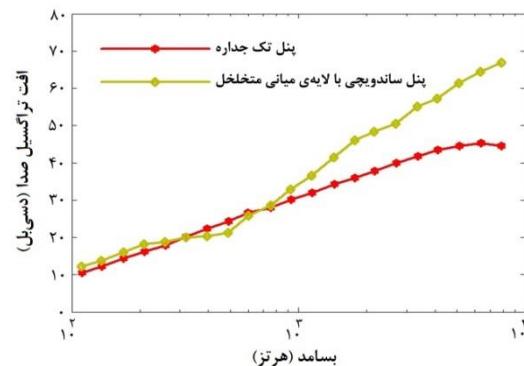
شکل ۱۴، نمودار تراز فشار صدای (اس‌پی‌ال)<sup>۱</sup> ناحیه سر راننده، که در آن از پنل متخلخل داشبورد استفاده شده، را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ نمودار اس‌پی‌ال ناحیه سر راننده.

به جهت محاسبه‌ی تراز صدای ایجاد شده در داخل خودرو و در ناحیه‌ی سر راننده، ابتدا داده‌های مورد نیاز را با توجه به شکل ۱۴ و منبع [۱۷] استخراج کرد، سپس مطابق معادله‌ی ۲۰، تراز صدای ایجاد شده در داخل کابین خودرو محاسبه می‌گردد. سپس میزان صدای محاسبه شده با میزان صدای استاندارد مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای این منظور داده‌های مورد نیاز مطابق با جدول ۳ می‌باشند:

می‌گردد. هم‌چنین استفاده از مواد جاذب متخلخل در بسامد بالای ۱۰۰۰ هرتز، سبب افزایش ۳۰/۶۴ درصدی افت تراگسیل صدا در پنل کف خودرو می‌گردد.



شکل ۱۲ افت تراگسیل صدای داخل کابین خودرو حاصل از پنل متخلخل کف خودرو.

جدول ۲ مشخصات ترکیبات مختلف برای پنل کف خودرو.

ضخامت هر لایه بر حسب میلی‌متر		پیکربندی پنل	کف خودرو
نمد	پلی‌بورتان	فولاد	
---	---	۱	۱
۵	۳	۱	۲

شکل ۱۳، ضریب افت تراگسیل صدای داخل کابین خودرو، حاصل از تغییرات پنل داشبورد، را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود: اولاً در محدوده بسامد بالا (۱۰۰۰ هرتز به بالا) استفاده از پنل‌های ساندویچی با لایه متخلخل عملکرد بسیار مناسب‌تری (در حدود ۱۵ دسی‌بل در بسامدهای بالا) در افت تراگسیل صدا نسبت به پنل‌های تک‌جداره دارند. ثانیاً با استفاده از لایه متخلخل بسامد بحرانی سازه کاهش می‌یابد و در این بسامد، ضریب افت تراگسیل صدا پنل متخلخل داشبورد کوچک‌تر از پنل تک لایه می‌باشد. هم‌چنین استفاده از مواد جاذب متخلخل در بسامد بالای ۱۰۰۰ هرتز، سبب افزایش ۲۵/۳۰ درصدی افت تراگسیل صدا در پنل داشبورد خودرو می‌گردد.

<sup>۱</sup> SPL; Sound Pressure Level

## ۷. بحث

در این پژوهش، تحلیل رفتار صوتی محفظه کابین یک خودروی سواری به منظور بررسی اثرات پنل‌های ساندويچی با لایه متخلخل عایق صوتی در کاهش تراز صدای داخل خودرو با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای) مورد مطالعه قرار گرفت. لذا در کنار روابط مربوط به تحلیل انرژی آماری، از نرمافزار وی‌ای-وان نیز بهره‌گیری گردید. برای این منظور، با ایجاد یک الگوی کامل خودرو، مشکل از ۳۰۰ زیرسامانه سازه‌ای و ۱۰۰ محفظه‌ی صوتی که توسط ۲۵۰۰ اتصال نقطه‌ای، خطی و صفحه‌ای به یکدیگر متصل شده بودند، به تحلیل الگوی با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری (اس‌ای‌ای) پرداخته شد. همچنانی با اعمال منابع اصلی نویه هوابرد و سازه‌برد در این خودرو، علاوه بر شناسایی مسیرهای اصلی تراگسیل نویه به داخل کابین خودرو، تأثیر کاربرد پنل‌های ساندويچی با لایه متخلخل، در اجزای خودرو از جمله پنل سقف، کف خودرو و پنل داشبورد، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با در نظر گرفتن پنل‌های ساندويچی با لایه متخلخل، در اجزای خودرو از جمله پنل سقف، کف خودرو و پنل داشبورد، میزان تراز صوتی ورودی به داخل کابین این خودرو اندازه‌گیری گردید. نتایج اعتبارسنجی بر دقت و صحت روش اس‌ای‌ای صحه‌گذاری می‌نمایند. همچنانی نتایج نشان می‌دهند که استفاده از پنل‌های ساندويچی با لایه‌ی میانی متخلخل سبب بهبود ضریب افت تراگسیل صدای خودرو، مخصوصاً در بسامدهای بالا می‌گردد.

## ۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات استفاده از عایق‌های صوتی متخلخل در رفتار صوتی قسمت‌های مختلف محفظه کابین یک خودروی سواری با استفاده از یک شبیه‌ساز مهندسی و بر پایه‌ی روش تحلیل انرژی آماری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پس از گوسازی زیرسامانه‌ها، محفظه‌های صوتی و اعمال منابع نویه (نویز) به الگو، رفتار صوتی قسمت‌های مختلف محفظه کابین خودرو استخراج گردید. تطابق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و روش اس‌ای‌ای، نشان‌دهنده‌ی دقت و صحت الگو و روش ارائه

جدول ۳ داده‌های استخراج شده جهت محاسبه تراز صدای داخل کابین خودرو.

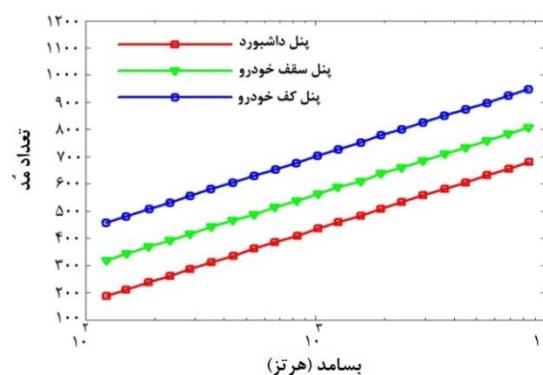
اکتاویاند استاندارد (دسی‌بل)							
۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۲۵	
۴۱,۱	۵۰,۳	۵۸,۸	۶۶	۶۸,۴	۷۲,۳	۷۵,۸	$L_p$ (dB)
-۱,۱	۱	۱,۲	•	-۳,۲	-۸,۹	-۱۶,۱	CFA (dB)
۴۰	۵۱,۳	۶۰	۶۶	۶۵,۲	۶۳,۴	۵۹,۷	CFA+ $L_p$

لذا تراز صدای ایجاد شده در داخل کابین خودرو برابر می‌شود با [۱۷]:

$$L_A = 10 \log_{10} \left[ \sum 10^{\frac{(CFA + L_p)}{10}} \right] = 69.5 \text{ (dBA)} \quad (۲۰)$$

با مقایسه مقدار فوق با استاندارد ای‌ای‌آرسی-۱۰۸-۰۱، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پنل متخلخل داشبورد، به تنها ی نمی‌تواند استاندارد فوق را تأمین نماید.

علاوه بر این، تعداد مدهای موجود در هر باند بسامدی در میزان تراگسیل صد به محفظه کابین خودرو نیز تأثیرگذار می‌باشد. لذا همان‌طور که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، با افزایش بسامد، تعداد مدهای موجود در هر باند بسامدی برای زیرسامانه‌های سازه‌ای از قبیل: پنل سقف، پنل کف و داشبورد افزایش می‌یابد و این بدان معناست که نتایج حاصل از تحلیل الگوی اس‌ای‌ای خودرو در بسامدهای بالا دارای اعتبار بیشتری است. زیرا در بسامدهای بالا تعداد مدهای موجود در هر باند بسامدی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵ تعداد مدهای در هر باند بسامدی برای زیرسامانه‌های سازه‌ای.

- [8] of Sound and Vibration, vol. 251, no. 4, pp. 631–649, 2002.
- [9] K. Daneshjou, R. Talebitooti, A. Nouri, “Analytical model of sound transmission through orthotropic double walled cylindrical shells,” Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 43, 2008.
- [10] J.S. Bolton, N.M. Shiao, Y.J. Kang, “Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials,” Journal of Sound and Vibration, vol. 191, no. 3, pp. 317–347, 1996.
- [11] J.H. Lee, J. Kim, “Simplified method to solve sound transmission through structures lined with elastic porous material,” The Journal of The Acoustical Society of America, vol. 110, no. 5, pp. 2282–2294, 2001.
- [12] M.H. Shojaeeefard, R. Talebitooti, R. Ahmadi, B. Ranjbar, “A study on acoustic behavior of poroelastic media bonded between laminated composite panels,” Latin American Journal of Solids and Structures, vol. 11, no. 13, pp. 2379–2407, 2014.
- [13] J. Zhou, A. Bhaskar, X. Zhang, “The effect of external mean flow on sound transmission through double-walled cylindrical shells lined with poroelastic material,” Journal of Sound and Vibration, vol. 333, no. 7, pp. 1972–1990, 2014.
- [14] Y. Liu, C. He, “On sound transmission through double-walled cylindrical shells lined with poroelastic material: Comparison with Zhou’s results and further effect of external mean flow,” Journal of Sound and Vibration, vol. 358, pp. 192–198, 2015.
- [15] Y. Liu, C. He, “Analytical modelling of acoustic transmission across double-wall sandwich shells: Effect of an air gap flow,” Composite Structures, vol. 136, pp. 149–161, 2016.
- [16] R. Talebitooti, K. Daneshjou, M. Kornokar, “Three dimensional sound transmission through poroelastic cylindrical shells in the presence of subsonic flow,” Journal of Sound and Vibration, vol. 363, pp. 380–406, 2016.
- [17] R. Talebitooti, A.M. Choudari Khameneh, “Wave propagation across double-walled laminated composite cylindrical shells along with air-gap using three-dimensional theory,” Composite Structures, vol. 165, pp. 44–64, 2017.
- [18] R.F. Barron, “Industrial Noise Control and Acoustics,” CRC Press, 2002.

شده در این مقاله می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که، استفاده از مواد جاذب متخلف سبب افزایش میزان افت تراگسیل صدا به داخل محفظه‌ی کابین خودرو در یک محدوده وسیع بسامدی می‌گردد، به طوری که تأثیر استفاده از این مواد در بسامدهای بالا بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر، استفاده از عایق‌های صوتی در قسمت‌های مختلف خودرو از جمله پنل سقف، کف خودرو و داشبورد سبب کاهش نویز (نویز) عبوری به محفظه‌ی کابین می‌گردد، اما تأثیر استفاده از این مواد در پنل سقف نسبت به دیگر قسمت‌ها بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، در صورت استفاده از مواد جاذب صدا به تنها یکی از اجزا مانند پنل داشبورد، نمی‌توان میزان تراز صوتی ایجاد شده در داخل کابین خودرو را مطابق استاندارد ایجاد نمود.

## ۹. فهرست منابع

- [1] H. Lyon, G. DeJong, M. Heckl. “Theory and application of statistical energy analysis,” The Journal of The Acoustical Society of America, 1995.
- [2] P.W. Smith, “Sound transmission through thin cylindrical shells,” The Journal of The Acoustical Society of America, vol. 29, no. 6, pp. 721, 1957.
- [3] U. Ingard, “Influence of fluid motion past a plane boundary on sound reflection, absorption, and transmission,” The Journal of The Acoustical Society of America, vol. 31, no. 7, pp. 1035, 1959.
- [4] L.R. Koval, “On sound transmission into a thin cylindrical shell under ‘flight conditions,’ ” Journal of Sound and Vibration, vol. 48, no. 2, pp. 265–275, 1976.
- [5] A. Blaise, C. Lesueur, “Acoustic transmission through a ‘3-D’ orthotropic multi-layered infinite cylindrical shell, part II: validation and numerical exploitation for large structures,” Journal of Sound and Vibration, vol. 171, no. 5, pp. 665–680, 1994.
- [6] Y. Tang, H. Robinson, J. Silcox, “Sound transmission through a cylindrical sandwich shell with honeycomb core,” in 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 877–886. 1996.
- [7] J.H. Lee, J. Kim, “Analysis and measurement of sound transmission through a double-walled cylindrical shell,” Journal