

# بررسی افت انتقال صوت<sup>۱</sup> مجموعه مکش هوای موتور با استفاده از مواد متخلخل عایق صوتی به روش تحلیل انرژی آماری<sup>۲</sup>

محمدحسن شجاعی فرد

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران  
mhshf@iust.ac.ir

روح ... طالبی

استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران  
rtalebi@iust.ac.ir

مآده امیرپور ملا\*

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران  
m\_amirpour@yahoo.com

\* نویسنده مسئول تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۰۲ پذیرش نهایی مقاله: ۸۹/۰۳/۰۱

## چکیده

یکی از مسایل موجود در مجموعه مکش هوای موتور ایجاد صدا در مجرای مجموعه مکش می باشد. تحلیل انرژی آماری مناسب ترین روش برای تحلیل رفتار ارتعاشاتی- صوتی سازه‌ها در محدوده پر بسامد است. به کمک این روش می توان سطح فشار صوت و پاسخ‌های ارتعاشی را پیش‌بینی کرد.

در این مقاله، ابتدا الگوی کامل مجموعه مکش هوای موتور یک خودرو با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری، نمونه‌سازی می‌گردد. در این الگو با ایجاد زیرمجموعه‌های مناسب و اعمال تحریک، افت انتقال صوت مجموعه مکش هوای موتور در محدوده پر بسامد محاسبه می‌شود. برای بررسی صحت نمونه‌سازی، یک الگوی ساده از مجرای هوا با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری در نرم‌افزار AutoSEA تحلیل می‌گردد و نتایج حاصل با نتایج حل تحلیلی مقایسه می‌شوند. در ادامه، نتایج بدست آمده از مجموعه مکش هوای موتور با داده‌های تجربی مقایسه و در محدوده پر بسامد صحت‌گذاری می‌گردند. سپس، به بررسی اثرات استفاده از مواد متخلخل بر روی افت انتقال صوت مجموعه پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این مواد اثرهای مطلوبی بر افزایش افت انتقال صوت موتور خواهند گذاشت. در نهایت، به مطالعه و بررسی اثرهای ضخامت و جنس این نوع مواد در افزایش افت انتقال صوت پرداخته می‌شود.

محدوده پر بسامد قابل شنیدنی، روش ساده‌ای وجود ندارد، روش‌های اجزای محدود<sup>۳</sup> و اجزای مرزی<sup>۴</sup> برای پیش‌بینی صدا و ارتعاشات در محدوده بسامدهای ضعیف و متوسط مؤثر می‌باشند. از طرفی پاره‌ای مسائل صدا

کلید واژه‌ها: تحلیل انرژی آماری، مواد متخلخل، مجموعه مکش هوای موتور، افت انتقال صوت، نرم‌افزار AutoSEA

## ۱- مقدمه

با توجه به اینکه برای پیش‌بینی صدا و ارتعاشات خودروهای سواری، هواپیماها، قطارها و ... که دارای سازه‌های پیچیده می‌باشند، در تمام

۱- Noise

۲- Statistical Energy Analysis(SEA)

۳- Finite Element method

۴- Boudry Element Method

## ۲- محاسبه افت انتقال صوت الگوی ساده شده مجرای هوای سامانه مکش موتور با استفاده از روش تحلیلی و انرژی آماری

### ۲-۱- روش تحلیلی

#### ۲-۱-۱- مروری بر روش بایوت

تنش در مواد متخلخل از نسبت نیروی مؤثر بر قالب (فریم) یا سیال بر واحد سطح ماده بدست می‌آید. بایوت الگوی لاگرانژی ظریفی را بسط داد که در آن معادلات تنش- کرنش بر اساس افت انرژی تغییر شکل، حاصل شده است که جزئیات این الگو در مرجع [۶] آمده است. معادلات تنش- کرنش در الگوی بایوت بدین صورت بیان می‌شوند:

$$\sigma_i = 2N e_i + A e_s + Q \varepsilon \quad i = x, y, z \quad (1)$$

که در معادله (۱)،  $e_i$  مؤلفه کرنش حجمی حالت جامد در راستای  $i$ ،  $e_s$  کرنش حجمی حالت جامد و  $\varepsilon$  کرنش حجمی حالت سیال می‌باشد.

$$e_s = \nabla \cdot \bar{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \nabla \cdot \bar{U} = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (3)$$

معادله‌های تنش برشی در حالت جامد ماده متخلخل بدین صورت می‌باشد:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = N \gamma_{xy} \quad ; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (4)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = N \gamma_{xz} \quad ; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (5)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = N \gamma_{zy} \quad ; \quad \gamma_{zy} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \quad (6)$$

اگر ماده متخلخل همگن فرض شود، رفتار صوتی آن به این صورت بیان می‌شود:

$$\nabla^4 e_s + A_1 \nabla^2 e_s + A_2 e_s = 0 \quad (7)$$

$$\nabla^2 \varpi + k_i^2 \varpi = 0 \quad (8)$$

و ارتعاشات در بسامدهای شدید اتفاق می‌افتد که تحلیل انرژی آماری مناسب‌ترین روش برای تحلیل رفتار صوتی و ارتعاشات مجموعه‌ها در محدوده پر بسامد می‌باشد [۱]. برای نخستین بار در دهه ۶۰ لیون و اسمیت روش تحلیل انرژی آماری را بسط دادند و معادله نویسی کردند. امروزه پایش<sup>۱</sup> غیر فعال صدا و استفاده از مواد عایق صوت، به دلیل هزینه‌بر و پیچیده بودن روش‌های پایش فعال و عدم کارایی این روش در محدوده پر بسامد، کاربرد وسیعتری پیدا کرده‌اند. چون که اکثر مواد عایق صوت، یا از مواد متخلخل ساخته می‌شوند و یا این مواد در ساختار آن‌ها بکار می‌روند، اغلب نمونه‌سازی صوتی مواد عایق صوت به معنای نمونه‌سازی صوتی مواد متخلخل می‌باشد.

در سال‌های اخیر علاقه خاصی به روش تحلیل انرژی آماری در صنعت خودروسازی مشاهده شده است، زیرا به وسیله این روش می‌توان تراز فشار صوت و ارتعاشات بسامدهای شدید را به کمک معادلات انرژی آماری تحلیل نمود. الگوی کامل تحلیل انرژی آماری یک خودرو را، اولین بار دجانگ<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۵ ارائه داد [۲]. دجانگ، صدا و ارتعاشات یک خودرو سواری را با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری مورد مطالعه قرار داد. ایان و وانوسکرک<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۵ در آزمایشی که همانند آزمون اندازه‌گیری ضریب جذب، در اتاق خودرو انجام دادند، سهم اجزاء مختلف موجود در اتاق خودرو را از نظر تأثیر هر یک از آن‌ها در جذب صوت برای صدای داخلی خودرو تعیین کردند [۳]. استیل<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۸، به مطالعه و بررسی صدای موتور با استفاده از روش تحلیل انرژی آماری پرداخت. او با اندازه‌گیری توان‌های ورودی به سامانه در پی دلیل اختلاف افت انتقال صوت بین روش تحلیل انرژی آماری و روش آزمایشگاهی بود. در سال ۲۰۰۲ زنگ<sup>۵</sup> و همکارانش [۴] اثر صفحه‌های فولادی ورقه‌ای<sup>۶</sup> را بر روی سطح صدای داخل خودرو مطالعه کردند. اونسای و همکارانش در سال ۲۰۰۷ کاربرد روش تحلیل انرژی آماری و نحوه بکارگیری آن را، در بررسی مسائل چالش‌انگیز موجود در یک خودرو از قبیل کاهش هزینه مواد و افزایش کیفیت و بهبود عملکرد صوتی و ارتعاشاتی، مطالعه کردند [۵].

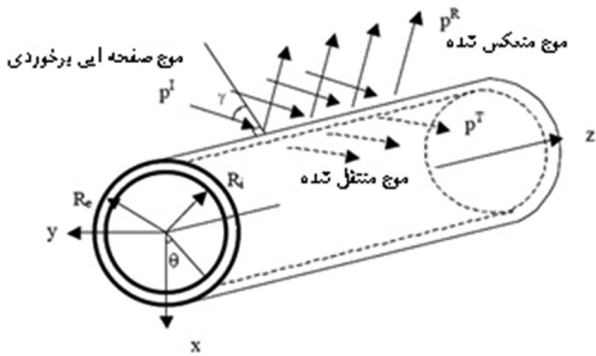
هدف اصلی در این مقاله بررسی رفتار صوتی مواد متخلخل و میزان تأثیر آن‌ها بر افت انتقال صوت مجموعه مکش هوای موتور به روش تحلیل انرژی آماری می‌باشد.

۱- Control  
۲- Dejong  
۳- Qian & Vanbuskirk  
۴- Steel  
۵- Xiandi Zeng  
۶- Laminated

قویترین عدد موج از بین نتایج انتخاب می‌شود و ماده به کمک عدد موج مورد نظر و چگالی معادل شبیه‌سازی می‌شود [۸].

### ۲-۱-۲- تشریح مسئله

شکل (۱) طرحوارهٔ مساله را نشان می‌دهد که در آن، یک موج صفحه‌ای با زاویهٔ  $\gamma$  به یک پوستهٔ استوانه‌ای دوجداره به ضخامت‌های  $h_i$  و  $h_e$  با یک لایهٔ متخلخل میانی به ضخامت  $h_e$  و با ابعاد عرضی نامحدود برخورد می‌کند [۹].



شکل ۱ طرحوارهٔ انتشار امواج صوتی از یک مجرای ساده

معادله‌های ارتعاشات صوتی بدین صورت می‌باشد:

$$c_1^2 \nabla^2 (P^I + P_1^R) + \frac{\partial^2 (P^I + P_1^R)}{\partial t^2} = 0 \quad (12)$$

$$c_2^2 \nabla^2 (P_2^T + P_2^R) + \frac{\partial^2 (P_2^T + P_2^R)}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

$$c_3^2 \nabla^2 (P_3^T) + \frac{\partial^2 (P_3^T)}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

معادله‌های حرکت پوسته‌های داخلی و خارجی نیز بدین صورت بیان می‌شوند که  $L_1$ ،  $L_2$  و  $L_3$  عملگر مشتق هستند [۱۰].

$$L_1 \{u_1^0, v_1^0, w_1^0\} = \rho_i h_i \ddot{u}_1^0 \quad (15)$$

$$L_2 \{u_1^0, v_1^0, w_1^0\} = \rho_i h_i \ddot{v}_1^0 \quad (16)$$

$$L_3 \{u_1^0, v_1^0, w_1^0\} + (P_2^T + P_2^R) - P_3^T = \rho_i h_i \ddot{w}_1^0 \quad (17)$$

$$L_1 \{u_2^0, v_2^0, w_2^0\} = \rho_e h_e \ddot{u}_2^0 \quad (18)$$

معادلهٔ تفاضلی (۷) متعلق به انتشار امواج تغییرات حجم<sup>۱</sup> در حالت جامد مادهٔ متخلخل است که از مرتبهٔ چهار می‌باشد و این به معنای وجود دو نوع موج فشاری است که با فرض یک حل هماهنگ (هارمونیک) صفحه‌ای به شکل  $e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$  که در آن بردار موج  $\vec{k}$  و بردار بردار موقعیت است، به آسانی می‌توان نشان داد که دو نوع موج طولی (فشاری) در ماده متخلخل ارتجاعی (الاستیک) منتشر می‌شود که عدد موج این دو نوع موج از معادلهٔ (۹) بدست می‌آیند [۷]:

$$k_{1,2}^2 = (A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_2}) / 2 \quad (9)$$

یکی از این موج‌ها به حالت جامد مادهٔ متخلخل برمی‌گردد که به آن موج قالب (فریم)<sup>۲</sup> می‌گویند و موج دیگر که ناشی از انتشار موج در حالت سیال مادهٔ متخلخل می‌باشد، موج هوابرد<sup>۳</sup> نام دارد.

معادلهٔ (۸) متعلق به انتشار موج برشی در حالت جامد و از مرتبهٔ دوم می‌باشد، بنابراین تنها یک نوع موج برشی (چرخشی<sup>۴</sup>) وجود خواهد داشت که عدد موج آن از معادلهٔ (۱۰) محاسبه می‌گردد:

$$k_t^2 = (\omega^2 / N) [\rho_{11}^* - (\rho_{12}^*)^2 / \rho_{22}^*] \quad (10)$$

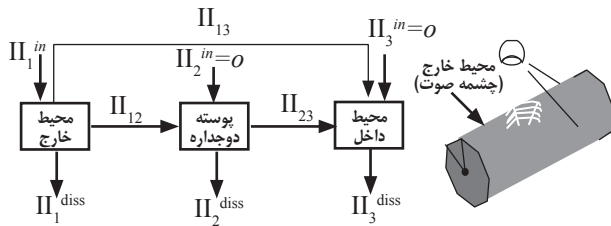
که در آن  $\omega$  بسامد زاویه‌ای،  $\rho_{11}^*$  چگالی موثر حالت جامد،  $\rho_{22}^*$  چگالی موثر حالت سیال و  $\rho_{12}^*$  چگالی مزدوج (کوپلینگ) است که برای در بر گرفتن اثر گرانشی سیال به صورت مختلط بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} \rho_{11}^* &= \rho_{11} + b/j\omega \\ \rho_{12}^* &= \rho_{12} - b/j\omega \\ \rho_{22}^* &= \rho_{22} + b/j\omega \end{aligned} \quad (11)$$

جزئیات به محاسبهٔ سایر متغیرها در مرجع [۷] آمده است. استفاده از این فرضیه در پوسته‌های استوانه‌ای به دلیل پیچیدگی انتشار چند موج<sup>۵</sup> دشوار می‌باشد. به همین دلیل از فرضیهٔ کیم در حل این مسئله استفاده می‌شود.

ایده اصلی در الگوی ساده شدهٔ کیم، نمونه‌سازی مادهٔ متخلخل با استفاده از قویترین موج انتشار یافته و جایگزینی مادهٔ متخلخل با یک سیال معادل است [۸]. چون که مؤثرترین موج پس از محاسبهٔ هر سه عدد موج موجود مشخص می‌شود، الگوی ساده شده از دو مرحله تشکیل می‌شود. در ابتدا تحلیل برای یک صفحه دو جداره تحت با طول بی نهایت و سطح مقطع مشابه با استفاده از روش کامل انجام می‌شود. سپس

- ۱- Dilatational waves
- ۲- Frame wave
- ۳- Airborne wave
- ۴- Rotational wave
- ۵- Multy- Wave



شکل ۲ الگوی تحلیل انرژی آماری سازه در نرم افزار AutoSEA به همراه جریان توان بین هر زیرمجموعه

در حالت کلی معادله‌های تعادل توان در حالت پایا برای این سه زیرمجموعه به صورت معادله (۲۶) خواهد شد:

$$\Pi_i^{in} = \Pi_i^{diss} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \Pi_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \Pi_{ji} \quad (26)$$

در معادله (۲۶)،  $\Pi_i^{in}$  توان ورودی به زیرمجموعه  $i$  ام،  $\Pi_i^{diss}$ ، توان اتلافی در مجموعه  $i$  ام و  $\Pi_{ij}$ ، توان انتقالی از زیرمجموعه  $i$  ام به زیرمجموعه  $j$  ام می‌باشد، که بدین صورت محاسبه می‌گردند:

$$\Pi_i^{diss} = \omega \eta_i E_i, \quad \Pi_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i \quad (27)$$

با نوشتن معادله‌های تعادل توان برای هر یک از سه زیرمجموعه و پس از حل همزمان آن‌ها، افت انتقال صوت در بازه بسامدی ۱۰۰ الی ۵۰۰۰ هرتز مطابق معادله (۲۸) محاسبه خواهد شد.

$$TL = 10 \log(1/\tau) = 10 \log\left(\frac{\Pi_{inc}}{\Pi_{23} + \Pi_{13}}\right) \quad (28)$$

با توجه به استاندارد ASTM E۹۰، محیط منبع به توسط یک منبع پراکنده صوتی (دیفیوز) تحریک می‌شود، لذا در اینجا نیز یک تحریک خارجی از نوع منبع پراکنده صوتی به زیرمجموعه ۱ (محیط منبع) اعمال می‌کنیم.

### ۲-۳- مقایسه بین نتایج تحلیلی و روش انرژی آماری

تنها زمانی پاسخ‌های حاصل از یک الگوی تحلیل انرژی آماری دارای اعتبار است که اولاً چگالی حالت (مودال) زیرمجموعه‌های آن بزرگ باشد و ثانیاً زیرمجموعه‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که به صورت ضعیف با یکدیگر مزدوج شده باشند یعنی ضریب اتلاف اتصال (کوپلینگ) بین زیرمجموعه‌ها نسبت به ضریب اتلاف داخلی زیرمجموعه‌ها کوچک باشد [۶]. پس از محاسبه و ارزیابی متغیرهای موردنیاز در روش تحلیل انرژی آماری، افت انتقال صوت را محاسبه می‌کنیم.

$$L_2 \{u_2^0, v_2^0, w_2^0\} = \rho_e h_e \dot{w}_2^0 \quad (19)$$

$$L_3 \{u_2^0, v_2^0, w_2^0\} - (P_2^T + P_2^R) + (P^I + P_1^R) = \rho_e h_e \dot{w}_2^0 \quad (20)$$

شرایط مرزی نیز به این صورت بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial(P^I + P_1^R)}{\partial r} = -\rho_1 \frac{\partial^2 w_2^0}{\partial t^2} \quad \text{at } r = R_e \quad (21)$$

$$\frac{\partial(P_2^T + P_2^R)}{\partial r} = -\rho_2 \frac{\partial^2 w_1^0}{\partial t^2} \quad \text{at } r = R_i \quad (22)$$

$$\frac{\partial(P_2^T + P_2^R)}{\partial r} = -\rho_2 \frac{\partial^2 w_2^0}{\partial t^2} \quad \text{at } r = R_e \quad (23)$$

$$\frac{\partial(P_3^T)}{\partial r} = -\rho_3 \frac{\partial^2 w_1^0}{\partial t^2} \quad \text{at } r = R_i \quad (24)$$

با حل همزمان این معادله‌ها، ضریب افت انتقال صوت سازه مطابق فرمول پاریس و بکارگیری روش انتگرال سیمپسون و نوشتن برنامه در نرم افزار Matlab محاسبه می‌گردد.

$$TL = 10 \log(1/\bar{\tau}) = -10 \log\left(2 \int_0^{\gamma_m} \tau(\gamma) \sin \gamma \cos \gamma d\gamma\right) \quad (25)$$

در معادله (۲۵)  $\gamma_m$  زاویه برخورد بیشینه است که معمولاً بین ۷۰ تا ۸۵ درجه، بسته به شرایط انتخاب می‌شود. در اینجا مقدار  $\gamma_m$  برابر ۷۸ انتخاب شده است [۸].

### ۲-۲- روش تحلیل انرژی آماری

در نمونه‌سازی مجموعه یاد شده به روش تحلیل انرژی آماری، مجموعه شامل سه زیرمجموعه می‌باشد. زیرمجموعه اول، چشمه صوت، زیرمجموعه دوم پوسته استوانه‌ای دوجداره متشکل از دو پوسته آلومینیومی با لایه متخلخل میانی و زیرمجموعه سوم، محیط دریافت کننده می‌باشد و تنها زیرمجموعه اول است که تحت تأثیر منبع صوتی خارجی قرار دارد. شکل (۲) الگوی تحلیل انرژی آماری ایجاد شده به توسط نرم افزار A-toSEA2 را، به همراه جریان توان بین هر سه زیرمجموعه در حالت پایا نمایش می‌دهد. برای نمونه‌سازی صوتی چنین سازه‌ای محیط منبع صوت به صورت پژواک<sup>۱</sup> و محیط گیرنده غیرانعکاسی<sup>۲</sup> فرض می‌شوند.

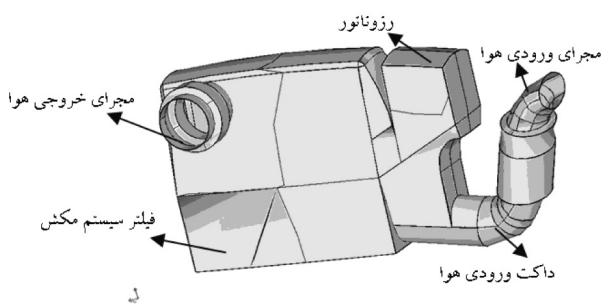
۱- Reverberant Room

۲- Anechoic Room

جدول ۱ مشخصات فیزیکی پلی پروپیلن [۱۱]

متغیرهای فیزیکی	پلی پروپیلن
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۹۰۵
ضریب یانگ (GPa)	۱٫۷
ضریب برشی (MPa)	۶۳۰
ضریب پواسن	۰٫۳۵
میرایی سازه	۰٫۰۰۷

در ادامه باید کلیه زیرمجموعه‌های سازه‌ای و صوتی مورد نیاز را برای تحلیل الگو ایجاد نماییم. الگوی انرژی آماری سامانه مکش هوای موتور مذکور شامل ۱۰۷ زیرسامانه سازه‌ای و ۲۱ زیرسامانه صدایی می‌باشد که با ۷۲۱ اتصال نقطه‌ای، خطی و صفحه‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند. در شکل (۴)، زیرسامانه‌های سازه‌ای اصلی الگوی انرژی آماری آورده شده است.

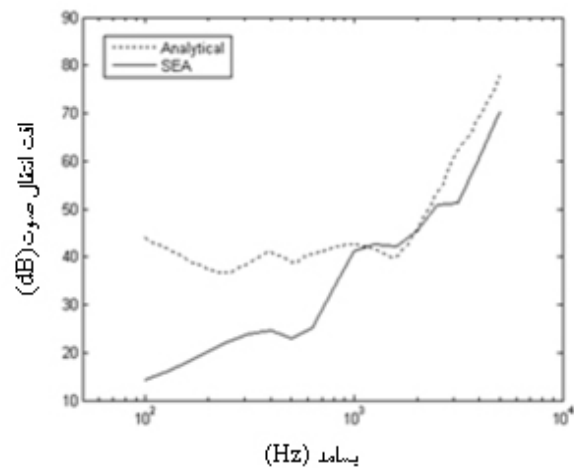


شکل ۴ زیر مجموعه‌های سازه‌ای الگوی انرژی آماری

فرض می‌شود که تمام زیر مجموعه‌های سازه‌ای الگو، از نوع صفحه (Plate) و یا تخت (Flat shell) باشد تا تنها انتقال موج خمشی<sup>۱</sup> در آن صورت پذیرد. ضخامت زیر مجموعه‌ها نیز بین ۲ تا ۵ میلی‌متر متفاوت است. زیر مجموعه‌های صوتی این الگو را به دو دسته محفظه‌های صوتی محیط داخل و خارج تقسیم می‌نماییم. زیر مجموعه صوتی خارج را به صورت یک منبع نامحدود با نام Semi Infinite Fluid (SIF) در نظر می‌گیریم. SIF به صورت یک محیط سیال صوتی ایزوتروپیک است که در معادله تعادل توان‌ها تاثیر چاه را دارد. شکل (۵) زیر مجموعه‌های صوتی الگو را نشان می‌دهد.

۱- Flexural

در شکل (۳) نتایج حاصل از دو روش تحلیلی و انرژی آماری در محاسبه ضریب افت انتقال صوت یک پوسته استوانه‌ای دوجداره با لایه متخلخل میانی مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که در بسامدهای شدید دو منحنی ناشی از نتایج حل تحلیلی و انرژی آماری همخوانی خوبی دارند. همان‌گونه که قبلاً بیان گردید، روش انرژی آماری در بسامدهای ضعیف به دلیل مقادیر کم چگالی حالت همراه با خطا می‌باشد. در بسامدهای شدید چگالی حالت بزرگ است و استفاده از روش انرژی آماری مناسب است در حالی که روش تحلیلی جواب مناسبی را پیشگویی نمی‌کند. دلیل این مسئله نقض شدن فرضیه بیوت و معادله‌های موجود در روش تحلیلی است که از آن فرضیه مشتق شده‌اند.

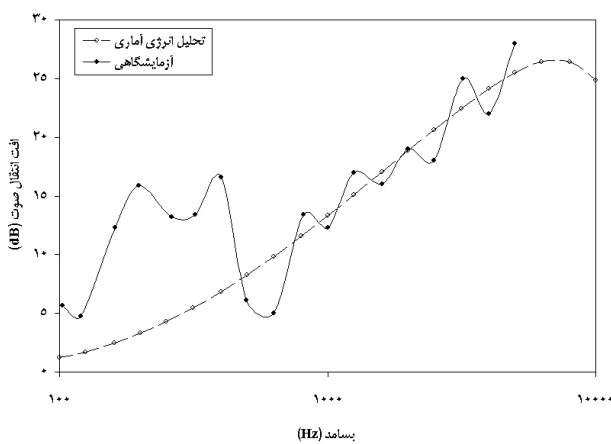


شکل ۳ مقایسه بین نتایج تحلیلی و روش انرژی آماری

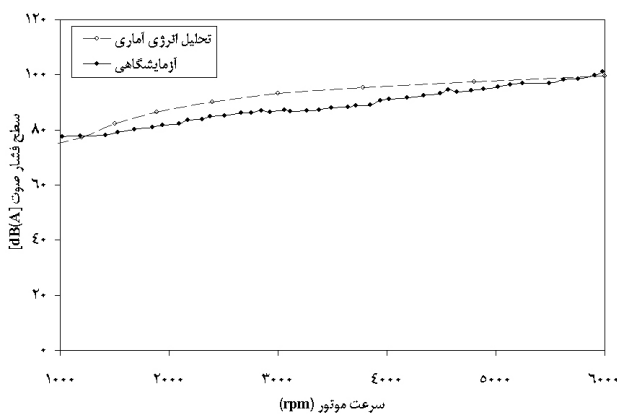
### ۳- محاسبه افت انتقال صوت از مجموعه مکش هوای موتور

برای ساخت الگوی سه بعدی سامانه مکش هوای موتور یک خودرو ابتدا باید مختصات  $x, y$  و  $z$  تک تک نقاط الگو را مستقیماً وارد نرم‌افزار نمود. راه دیگر برای ساخت الگو وارد کردن الگوی CAD به صورت پرونده‌های CATIA, IGES, SAT و یا وارد کردن الگوی FE به صورت پرونده‌های I-DEAS و NASTRAN می‌باشد. برای نمونه‌سازی مجموعه مکش ابتدا الگوی CAD مجموعه مکش موتور EFV را به صورت پرونده وارد نرم‌افزار می‌کنیم. پس از وارد کردن الگو و تعریف کلیه مواد و خواص فیزیکی مورد نیاز، باید تمام زیرمجموعه‌های سازه‌ای و صوتی مورد نیاز را برای تحلیل الگوی مورد نظر ایجاد نماییم. جنس ماده بکار رفته در ساخت مجموعه مکش هوای موتور EFV پلی پروپیلن می‌باشد. در جدول (۱) خواص فیزیکی این ماده آورده شده است.

موتور EFV موجود در مرکز تحقیقات ایران خودرو) را نشان می‌دهند و مویید این مطلب است که تنها در بسامدهای شدید منحنی افت انتقال صوت بدست آمده از روش انرژی آماری تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی موجود دارند. اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و انرژی آماری در بسامدهای ضعیف نیز به دلیل مقادیر کم چگالی حالت زیرسامانه‌ها می‌باشد. زیرا همان‌طور که پیش از این ذکر شد تنها زمانی پاسخ‌های حاصل از یک الگوی انرژی آماری دارای اعتبار است که چگالی حالت زیرمجموعه‌های آن بزرگ باشد. نتایج تجربی، از آزمون سامانه مکش موتور EFV که در شرکت آلمانی FEV انجام گرفته، استخراج شده است.

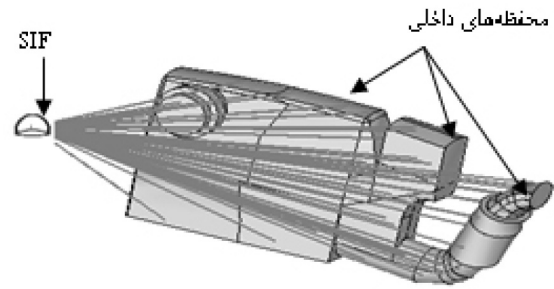


شکل ۷ مقایسه افت انتقال صوت بین نتایج آزمایشگاهی و روش انرژی آماری



شکل ۸ مقایسه سطح فشار صوت بین نتایج آزمایشگاهی و روش انرژی آماری

در ادامه اثر استفاده از مواد متخلخل پلی یورتان (بکاررفته در فرضیه بیوت) در مجرای ورودی هوا تحلیل شود. شکل‌های (۹) و (۱۰)، تأثیر این مواد را در افزایش افت انتقال صوت و کاهش سطح فشار صوت در محدوده بر بسامد نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در

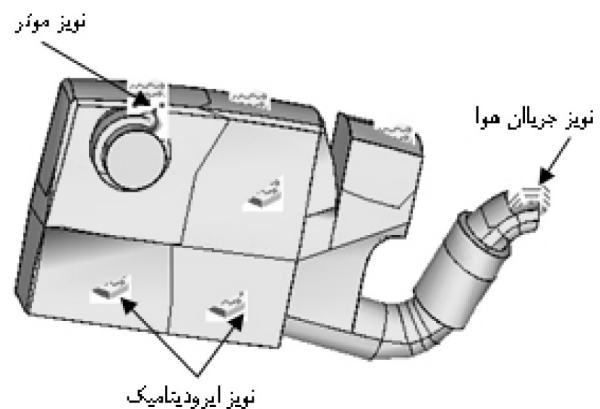


شکل ۵ زیرمجموعه‌های صوتی الگوی انرژی آماری

پس از ایجاد الگوی انرژی آماری، نمونه‌سازی تحریک به شکل جریان هوای مکش شده و لایه مرزی مغشوش ایده‌آل برای شبیه‌سازی جریان هوای عبوری بر روی سطح خارجی انجام شده است. چون هدف از این مقاله محاسبه افت انتقال صوت می‌باشد و این متغیر نیز مستقل از منابع تحریک است [۱۲]، در نتیجه منابع تحریک را ایده‌آل در نظر می‌گیریم. از حل معادله‌های جریان توان و تعادل انرژی بین کلیه زیرمجموعه‌های موجود در الگوی انرژی آماری، طبق معادله (۲۹)، متغیرهای سامانه، انرژی ورودی، توان انتقالی و توان میرایی هر زیرمجموعه تعیین می‌گردد.

$$\Pi_{i,in} = \omega \eta_i E_i + \sum_{j=i}^n \omega (\eta_{ij} E_i - \eta_{ji} E_j) \quad ; \quad n_i \eta_{ij} = n_j \eta_{ji} \quad (29)$$

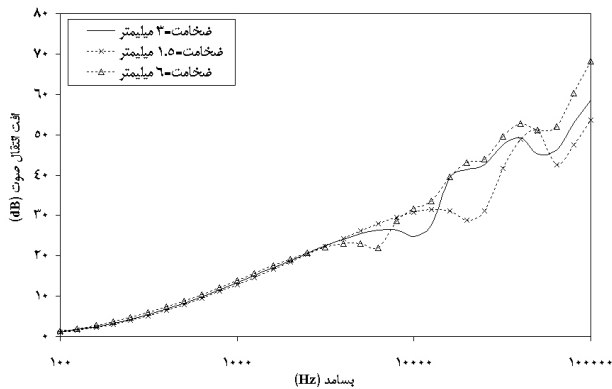
شکل (۶) الگوی کامل انرژی آماری مجموعه مکش هوای موتور را نشان می‌دهد.



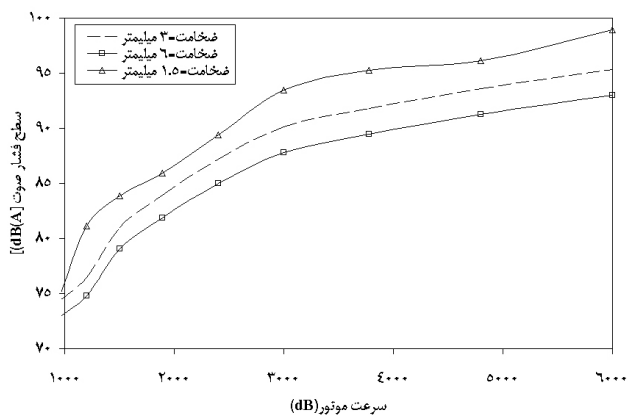
شکل ۶ الگوی انرژی آماری مجموعه مکش هوای موتور EFV و نحوه بارگذاری بر آن

در نهایت با تحلیل این الگو، افت انتقال صوت و سطح فشار صوت در محل گوش راننده بدست می‌آید. شکل‌های (۷) و (۸) مقایسه بین نتایج حاصل از روش انرژی آماری و داده‌های آزمایشگاهی (آزمون صدایی

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) اثر مثبت افزایش ضخامت ماده متخلخل را بر افت انتقال صوت و سطح فشار صوت نشان می‌دهند. ضمن اینکه این افزایش ضخامت موجب کاهش بسامد بحرانی نیز می‌گردد. از طرفی با دو برابر شدن ضخامت ماده متخلخل افت انتقال صوت سازه به طور کلی به اندازه ۸٪ افزایش می‌یابد و سطح فشار صوت در مجموعه مکش هوا در حدود ۳ dB کاهش می‌یابد.



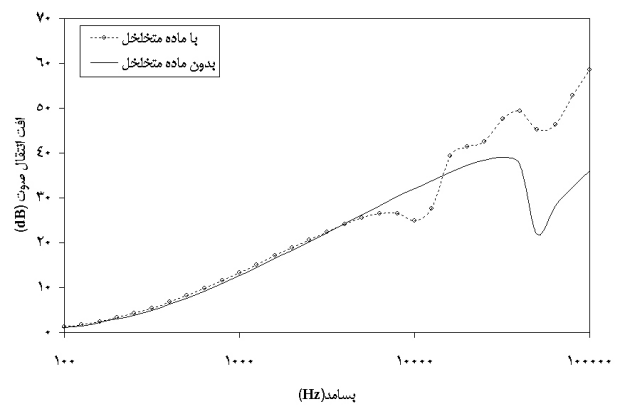
شکل ۱۱ افت انتقال صوت مجموعه مکش هوای موتور با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت مواد متخلخل



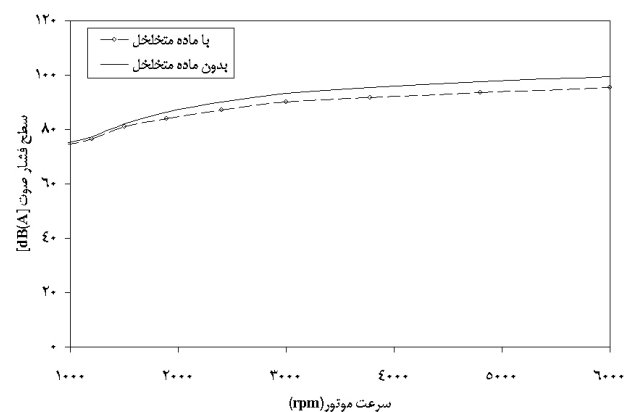
شکل ۱۲ سطح فشار صوت مجموعه مکش هوای موتور با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت مواد متخلخل

در ادامه تأثیر انواع مختلف متخلخل استفاده شده را در صنعت خودرو بر روی افت انتقال صوت و سطح فشار صوت بررسی می‌کنیم. در جدول (۲) مشخصات فیزیکی انواع مختلف این مواد آورده شده است.

محدوده پر بسامد (شدیدتر از ۱۰۰۰۰ هرتز) استفاده از مواد متخلخل عایق صوت عملکرد بسیار مناسب‌تری در افت انتقال صوت نسبت به حالت بدون آن‌ها دارد. به‌طوریکه استفاده از این مواد می‌تواند بیش از ۲۵٪ افت انتقال صوت را مخصوصاً در محدوده پر بسامد افزایش دهد. از طرفی استفاده از این مواد در تمام دورها سطح فشار صوت را کاهش می‌دهد و در کل<sup>۱</sup> شاهد کاهش سطح فشار صوت در محل گوش راننده به میزان ۴ dB می‌باشیم. مشاهده می‌شود که در محدوده پر بسامد، استفاده از پوشش مواد متخلخل در مجرای هوا به‌صورت یک لایه میانی عملکرد بسیار مناسب‌تری در کاهش صوت مجموعه مکش هوای موتور خواهد داشت. در جدول (۲) مشخصات فیزیکی ماده متخلخل پلی یورتان [۷] آورده شده است.

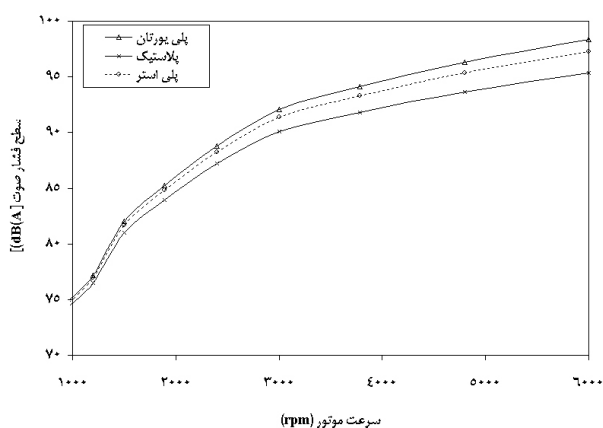


شکل ۹ افت انتقال صوت مجموعه مکش هوای موتور با در نظر گرفتن مواد متخلخل و بدون آن



شکل ۱۰ سطح فشار صوت سامانه مکش موتور با در نظر گرفتن مواد متخلخل و بدون آن

۱- Overall



شکل ۱۴ اثر انواع مواد متخلخل صنعتی بر روی سطح فشار صوت

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر استفاده از مواد متخلخل در مجرای ورودی هوا در مجموعه مکش موتور مورد مطالعه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که:

۱. استفاده از مواد متخلخل بر روی افت انتقال صوت در بسامدهای شدید بسیار مؤثر است. به طوری که استفاده از این مواد می‌تواند بیش از ۲۵٪ افت انتقال صوت را مخصوصاً در محدوده‌ی پر بسامد افزایش دهد. در ضمن افت فشار صوت سامانه مکش را در حدود ۴ dB کاهش می‌دهد.
۲. با افزایش ضخامت مواد متخلخل افت انتقال صوت افزایش و سطح فشار صوت کاهش می‌یابد. به طوری که با دو برابر شدن ضخامت ماده متخلخل سطح فشار صوت تقریباً ۳ dB کاهش می‌یابد.
۳. به دلیل هزینه گران و زمان بر بودن آزمون‌ها در صورت صحت‌گذاری نتایج نرم‌افزار می‌توان از آن‌ها برای پایش کیفیت خودرو قبل از نهایی کردن طرح استفاده کرد.

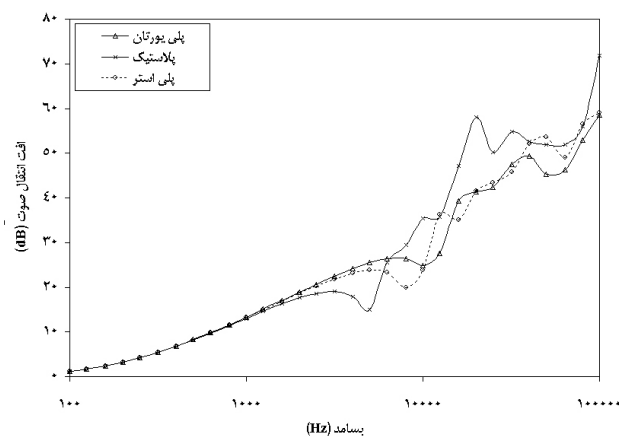
#### سپاسگزاری

نویسنده این مقاله، از همکاری مرکز تحقیقات ایران خودرو و شرکت تحقیقات موتور ایران خودرو به‌ویژه آقایان مهندس رستم مهرزاد و مهندس مهدی احمدی که زمینه دسترسی به اطلاعات آزمایشگاهی را فراهم نمود، کمال تشکر و قدردانی را دارد.

جدول ۱۲ مشخصات فیزیکی انواع مواد متخلخل [۱۳]

متغیرها	پلی استر	پلی استر	پلی یورتان
ضخامت (m)	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳
تخلخل	۰,۹۷	۰,۹۸	۰,۹
مقاومت جریانی	۸,۷e۴	۱۳۵e۴	۲۵e۴
ضریب سازه	۲,۵۲	۱,۷	۷,۸
طول مشخصه ویسکوز (m)	۳,۷e-۵	۸e-۵	۲,۲۶e-۴
طول مشخصه حرارتی (m)	۱,۱۹e-۴	۱,۶e-۴	۲,۲۶e-۴
چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )	۳۱	۳۰	۳۰
ضریب یانگ (Pa)	۱,۴۳e۵	۵/۴e۵	۸e۵
ضریب پواسن	۰,۳	۰,۳۵	۰,۴
میرایی سازه	۰,۰۵۵	۰,۱	۰,۲۶۵

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) اثر انواع مختلف مواد متخلخل استفاده شده را در صنعت خودروسازی بر روی افت انتقال صوت و سطح فشار صوت نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که کاهش در مقدار ضریب یانگ موجب افزایش افت انتقال صوت در بسامدهای شدید خواهد شد. علت اینکه عامل ضریب یانگ تنها در بسامدهای زیاد اثرات بیشتری دارد این است که محدوده بسامدی شدید ناحیه جرم پایش می‌باشد و تغییرات جرمی سازه در بسامدهای شدید به شدت بر روی TL سازه اثر خواهد گذاشت. استفاده از ماده پلاستیک در کاهش سطح فشار صوت در بسامدهای شدید مؤثرتر می‌باشد. در جدول (۲) مشخصات فیزیکی مربوط به انواع مختلف مواد متخلخل آورده شده است.



شکل ۱۳ اثر انواع مواد متخلخل صنعتی بر روی افت انتقال صوت

## References

- 1- A.Ohadi hamedani, J.Langroudi, “ forecast of SPL of acoustical cavity in high frequency range using SEA”, 12th annual conference on mechanical engineering, Tehran university,Iran, 2004
- 2- R. G. Dejong, “A Study of Vehicle Interior Noise Using Statistical Energy Analysis”, SAE Paper 850960, 1985.
- 3- I. K. Delanghe, “SEA : An Approach to Model High Frequency Vibro-Acoustic”, ISAAC7, Leuven, Sep. 1996.
- 4- X. Zeng, J. Woo and H. Tang, “The Effects of Laminated Steel Body Panels on Vehicle Interior Noise”, Proceedings of the second International AutoSEA Users Conference, Michigan, April 2002.
- 5- T. Onsay, “ Use of SEA in a Car Program”, SAE Noise & Vibration Conference, May 2007.
- 6- M. A. Biot, “Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Structural porous Solid I, Low Frequency Range”, J. of Acoustical Society of America, Vol. 28, No. 2, pp. 168-178, 1956.
- 7-J.S.Bolton, N.M.Shiau, Y.J.Kang, “Sound Transmission through Multi-Panel Structures Lined with Elastic Porous Materials”, Journal of Sound and Vibration, 191, 317-347, 1996.
- 8- J.Kim, J.H., Lee, “Simplified method to solve sound transmission through structures lined with elastic porous material”, Journal of Sound and Vibration, 2001.
- 9- K.Daneshjou, R.Talebitooti, A.Nouri, H.Ramezani, “Wave propagation through orthotropic cylindrical double walled shell lined with porous materials”, 16th annual conference on mechanical engineering, Shahid bahonar university of kerman,Iran, 2008
- 10- W.Soedel, “Vibration os shells and plates”, New York, Marcel Dekker, Inc. 1993
- 11- <http://www.cctplastics.com/polypropylene.html>
- 12- J.A.Steel, ”A study of engine noise transmission using statistical energy analysis”, ProQuest Science Journals, 2005.
- 13- “AutoSEA2 Theory & Q. A. Manual”, Vibro-Acoustic Science, 2005.

# A Study on Noise Transmission Loss (TL) Through Duct of Air Intake System of Engine with Porous Insulator Considering Statistical Energy Analysis Method

**M.H. Shojaeefard**

Prof. IUST. Automotive. Eng. Dept.  
mhshf@iust.ac.ir

**R. Talebi**

Assistent. Prof. IUST. Automotive. Eng. Dept.  
rtalebi@iust.ac.ir

**M. Amirpour Molla\***

MS student. IUST. Automotive. Eng. Dept.  
m\_amirpour@yahoo.com

---

\*Corresponding Authors

Received: Dec. 23, 2009

Accepted in Revised Form: May. 22, 2010

## Abstract

There is a main problem that the noise generated in air intake system may be disgusting. Statistical energy analysis is a suitable method for acoustical - vibration analysis of structures in high frequency range. In this paper, the air intake system of an engine compartment is modeled using SEA. The transmission loss through the intake duct is calculated with importing CAD model and creating subsystems at high frequency range. In order to verify the results, a simple model of double walled cylindrical shell is modeled in AutoSEA, and the results are compared with those of analytical ones. In addition, comparing the results of fully modeled of intake systems with experimental data available shows a good accuracy of results especially in high frequency range. Furthermore, the influence of inserting porous material is studied. Finally, the influence of some other parameters such as the thickness of the porous layers on the transmission loss of the system is investigated

*Keywords: Statistical Energy Analysis, Porous Material, Air Intake System, Transmission Loss, AutoSEA Software*