

تحلیل اثرات مواد متخلخل در سیستم مکش موتور خودرو به روش انرژی آماری

محمدحسن شجاعی فرد^۱ روح ... طالبی^{۲*} مائده امیرپور ملا^۳ رضا احمدی^۴

* نویسنده مسئول: rtalebi@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله تحلیل رفتار آکوستیکی سیستم مکش موتور خودرو به منظور بررسی اثرات استفاده از مواد متخلخل عایق صوت در آن برای کاهش سطح صدای داخل خودرو به روش تحلیل انرژی آماری مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا اصول و معادلات جامع روش تحلیل انرژی آماری بیان شده و سپس نحوه مدل‌سازی کامل سیستم مکش موتور یک خودرو با استفاده از این روش تشریح می‌شود. در این مدل با ایجاد زیرسیستم‌های مناسب و اعمال منابع اصلی صوت موجود در سیستم مکش موتور، افت انتقال صوت و سطح فشار صوت سیستم مکش هوا در محدوده فرکانسی بالا محاسبه می‌شود. در ادامه نتایج به دست آمده از تحلیل انرژی آماری سیستم مکش خودرو با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و در محدوده فرکانسی بالا صحنه‌گذاری می‌شوند. در نهایت به بررسی اثرات استفاده از مواد متخلخل بر روی افت انتقال صوت سیستم مکش موتور پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این مواد اثرات مطلوبی در افزایش افت انتقال صوت سیستم مکش موتور و نیز کاهش سطح صدای داخل کابین خودرو خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: سیستم مکش موتور، تحلیل انرژی آماری، مواد متخلخل، افت انتقال صوت.

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۱- مقدمه

برای پیش‌بینی صوت و ارتعاشات سازه‌های پیچیده‌ای مانند خودروهای سواری، هواپیماها و قطارها روش ساده‌ای وجود ندارد. روش‌های اجزا محدود^۱ و المان مرزی^۲ برای پیش‌بینی صوت و ارتعاشات در محدوده فرکانس‌های پایین و متوسط مؤثرند. از طرفی پاره‌ای مسائل صوت و ارتعاشی در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتند، لذا روش تحلیل انرژی آماری مناسب‌ترین تکنیک برای تحلیل رفتار آکوستیکی و ارتعاشات سیستم‌ها در محدوده فرکانسی بالا است [۱-۲].

برای نخستین بار لیون و اسمیت با همکاری هم روش تحلیل انرژی آماری را بسط داده و فرمول‌بندی کردند و پارامترهای تحلیل انرژی آماری را مورد ارزیابی قرار دادند [۱]. در دهه ۸۰ محاسبات کامپیوتری تحلیل انرژی آماری انجام شد و در دهه ۹۰ کاربردهای تحلیل انرژی آماری در صنایع مختلف خودروسازی و هوافضا عملی گردید [۱-۴]. مدل کامل تحلیل انرژی آماری یک خودرو اولین بار توسط دجانگ ارائه شد [۵]. سیمرمن و همکارانش برای مدل‌سازی آکوستیکی خودرو از مدل تحلیل انرژی آماری برای شبیه‌سازی رفتار مواد مانع صوت به عنوان یکی از زیرسیستم‌های خودرو استفاده کردند [۶]. دیاس و همکارانش با مدل کردن مواد متخلخل عایق صوت نشان دادند چنانچه این مواد در سازه‌های چند لایه بعنوان جداکننده در ساختار روکش‌های داخل کابین خودرو بکار روند، می‌توانند در کاهش صوت داخل کابین خودرو مؤثر باشند [۷].

در روش تحلیل انرژی آماری از روابط منسوب به جریان‌ات انرژی استفاده می‌گردد. اساس مدل تحلیل انرژی آماری بالانس کردن انرژی دینامیکی و جریان توان در میان زیرسیستم‌ها است. فرض اصلی در این روش این است که زیرسیستم در نظر گرفته شده دارای تعداد کافی مودهای رزونانس در فرکانس مورد نظر (چگالی مودال بالا) باشد. بنابراین این روش فقط برای مدل‌سازی در فرکانس‌های بالا به کار گرفته می‌شود. نرم‌افزار موجود در این زمینه نرم‌افزار

AUTOSEA^۲ است که در این مقاله نیز از نرم‌افزار مذکور برای مدل‌سازی سیستم مکش موتور استفاده شده است. امروزه کنترل غیر فعال صوت و استفاده از مواد عایق صوت، به سبب هزینه‌بر و پیچیده بودن روش‌های کنترل فعال و عدم کارایی این روش در محدوده فرکانس بالا، کاربرد وسیع‌تری دارد. در سال‌های اخیر روش‌های متفاوتی برای کاهش صوت سیستم مکش موتور خودرو پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌های مؤثر استفاده از مواد متخلخل است که امروزه کاربردهای بسیاری در صنایع خودروسازی پیدا کرده است [۸].

تاکنون در مورد کاربرد مواد متخلخل برای کاهش نویز سیستم مکش موتور تحلیل صورت نگرفته است. لذا هدف اصلی در این مقاله بررسی رفتار آکوستیکی مواد متخلخل و میزان تأثیر آنها در افت انتقال صوت سیستم مکش موتور به روش تحلیل انرژی آماری است. ضمناً به دلیل هزینه بالا و زمان‌بر بودن تست‌های آزمایشگاهی بر روی یک خودروی واقعی در صورت صحت‌گذاری نتایج نرم افزار می‌توان از آنها برای کنترل کیفیت خودرو قبل از نهایی کردن طرح استفاده کرد.

۲- اصول روش تحلیل انرژی آماری

روش تحلیل انرژی آماری شامل سه گام اصلی است. این سه گام عبارت‌اند از: تعریف مدل سیستم، به‌دست آوردن پارامترهای مدل و ارزیابی متغیرهای پاسخ که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. متغیر اولیه در این روش، سطوح انرژی مودهای تشدید در یک سیستم است. کمیت‌های دیگر پاسخ ارتعاشی و آکوستیکی از سطوح انرژی مشتق می‌شوند. مبنای تحلیل انرژی آماری بر پایه جریان یافتن و ذخیره شدن انرژی دینامیکی در زیرسیستم‌ها است. انرژی ورودی به زیرسیستم‌ها از منابع خارجی تأمین می‌شود. انرژی توسط میرایی درونی زیرسیستم تلف و یا به دیگر زیرسیستم‌ها منتقل می‌شود [۱، ۲].

۱ - Finite Element Method (FEM)

۲ - Boundry Element Method (BEM)

۲-۱- تعریف مدل سیستم

همچنین ضریب اتلاف کوپلینگ می تواند به دیگر فاکتورهای انتقال توان نظیر تلفات انتقال (TL) و ضریب تشعشع بستگی داشته باشد [۴-۱].

۲-۳- ارزیابی متغیرهای پاسخ

بعد از به دست آوردن پارامترهای زیرسیستم، می توان معادلات توازن انرژی را برای هر زیرسیستم نوشت. با توجه به اینکه تعداد معادلات برابر با انرژی های نامعین زیرسیستم هاست، پس می توان انرژی زیرسیستم ها را به دست آورد. برای مدل های تحلیل انرژی آماری با تعداد زیرسیستم های بالا، می توان معادلات را به روش های عددی استاندارد حل کرد. برای این حالت معادلات جریان توان را می توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$[A]\{\mathcal{E}\} = \{\Pi_{in}\} \quad (1)$$

Π_{in} توان ورودی از منابع تحریکات خارجی به زیرسیستم ها و $[A]$ ماتریس مقارن تشکیل شده از ضرایب اتلاف داخلی، ضرایب اتلاف کوپلینگ و چگالی مودال است. بردار انرژی مودال $\{\mathcal{E}\}$ را می توان با معکوس کردن ماتریس $[A]$ به دست آورد [۱].

یکی از اصول اساسی تحلیل انرژی آماری این است که جریان توان متوسط بین دو گروه کوپله شده از مودهای دینامیکی با اختلاف انرژی های مودال متوسط متناسب است. بدین ترتیب تعیین پاسخ های دینامیکی سیستم که شامل مودهای تشدید زیادی در محدوده فرکانسی معینی است، با تقسیم کردن مودها به زیرسیستم ها و نوشتن معادلات بالانس توان به صورت $\Pi_{in} = \Pi_{out}$ برای هر زیرسیستم، به دست می آید. در بیشتر کاربردهای عملی، هر سیستم متشکل از چندین زیرسیستم است که هر یک از زیرسیستم ها ممکن است با مجموعه ای از زیرسیستم های مجاور خود کوپله شده باشد. معادلات جریان انرژی برای هر زیرسیستم از یک سیستم به صورت زیر می باشد:

$$\Pi_{ij} = \omega(\eta_{ij}E_i - \eta_{ji}E_j) \quad ; \quad n_i\eta_{ij} = n_j\eta_{ji} \quad (2)$$

انرژی متوسط اتلافی در زیرسیستم i ام به صورت زیر است:

$$\Pi_{diss} = \omega\eta_i E_i \quad (3)$$

اساس مدل تحلیل انرژی آماری ایجاد توازن بین انرژی دینامیکی و جریان توان در میان زیرسیستم ها است. یک سیستم پیچیده به صورت مجموعه ای از زیرسیستم ها که با اجزای فیزیکی پایه (تیر، ورق پوسته، لوله و حجم های آکوستیکی) به هم پیوسته شده اند، مدل می شود. مدل کردن یک سیستم طبق مراحل زیر انجام می شود: تقسیم سیستم به زیرسیستم ها، تعیین کوپلینگ فیزیکی بین زیرسیستم ها و تعیین نوع تحریکات خارجی اعمالی بر روی سیستم [۲، ۱].

۲-۲- به دست آوردن پارامترهای مدل

حل کردن معادلات بالانس جریان توان بین زیرسیستم ها، نیازمند به دست آوردن پارامترهای زیرسیستم ها است. پارامترهای هر مدل تحلیل انرژی آماری عبارت اند از: چگالی مودال^۱ زیرسیستم ها، ضریب اتلاف داخلی^۲ زیرسیستم ها، ضریب اتلاف کوپلینگ^۳ بین زیرسیستم ها و توان ورودی به زیرسیستم ها. تعداد مود به صورت یکی از سه حالت چگالی مودال، تعداد مودهای تشدید در باند فرکانس یا فضای فرکانس متوسط بین رزونانس های مودال بیان می شود. روش های تئوری و عددی برای بررسی تعداد مود انواع زیرسیستم های متداول بر اساس خواص فیزیکی مواد و هندسه زیرسیستم موجود است. برای زیرسیستم های غیرایده ال فرمول های تئوری سهل و آسان موجود نیست. در این حالت از روش های تجربی استفاده می شود. ضریب اتلاف داخلی یک پارامتر اولیه برای پیش بینی عکس العمل ارتعاشی سازه هاست. این پارامتر از فرمول های تجربی به دست می آید. پارامتر ضریب اتلاف کوپلینگ منحصراً مختص به روش تحلیل انرژی آماری است. این کمیت معرف کیفیت اتصال دو زیرسیستم است. ضریب اتلاف کوپلینگ بین زیرسیستم ها را می توان از روش های تئوری و تجربی به دست آورد.

۱- Modal Density

۲- Internal Loss Factor

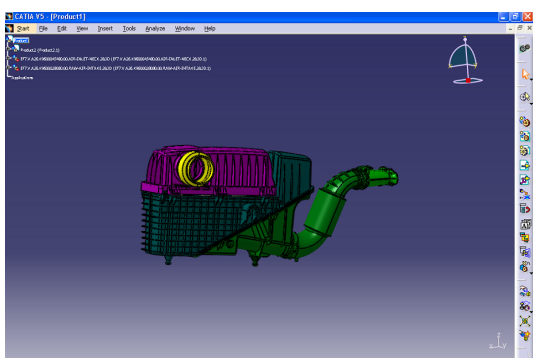
۳- Coupling Loss Factor

موتور خودرو، از یک مدل تحلیل انرژی آماری برای مدل سازی آکوستیکی آن توسط نرم افزار AutoSEA2 استفاده می شود که در آن لایه متخلخل به عنوان یکی از زیرسیستم های سیستم مکش شبیه سازی است.

۳-۱- شبیه سازی مدل تحلیل انرژی آماری سیستم مکش موتور با کاربرد مواد پوروالاستیک عایق صوت

برای ساخت مدل سه بعدی سیستم مکش موتور ابتدا باید مدل اجزا محدود آن را از سایر نرم افزارهای مدل سازی از قبیل CATIA، NASTRAN به نرم افزار شبیه سازی وارد کرد [۱۰]. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است ابتدا مدل سیستم مکش موتور EFV توسط نرم افزار CATIA ساخته شده و سپس وارد نرم افزار AUTOSEA می شود.

پس از وارد کردن مدل و تعریف کلیه مواد و خواص فیزیکی مورد نیاز، زیرسیستم های سازه ای و آکوستیکی مورد نیاز برای تحلیل مدل سیستم مکش ایجاد می شود. باید به این نکته توجه نمود که مدل اجزا محدود سیستم مکش مشتمل بر بیش از ۵۰۰۰ المان است، که تنها تعدادی از این المان ها که مربوط به اجزای اصلی در تحلیل انرژی آماری مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل (۱) مدل سازی سیستم مکش موتور در محیط CATIA.

پس از ایجاد تمامی زیرسیستم های مدل مذکور، اتصال بین هر یک از آنها صورت می گیرد. یکی از قابلیت های مناسب این نرم افزار، ایجاد اتصال بین تمامی زیرسیستم ها

که η_{ij} بیانگر ضریب اتلاف داخلی زیرسیستم i ام است. معادلات کلی تحلیل انرژی آماری یک سیستم را می توان با نوشتن معادلات بالانس انرژی برای هر زیرسیستم به دست آورد. اگر سیستمی دارای n زیر سیستم باشد معادله بالانس انرژی برای زیر سیستم i ام به صورت زیر است:

$$\Pi_{i,in} = \Pi_{i,diss} + \sum_{j \neq i} \Pi_{i \rightarrow j} - \sum_{j \neq i} \Pi_{j \rightarrow i} \quad (4)$$

با جایگذاری معادلات پایه (۲) و (۳) در معادله (۴) نتیجه می شود:

$$\Pi_i = \omega \eta_{ii} E_i + \sum_{j \neq i} \omega (\eta_{ij} E_i - \eta_{ji} E_j) \quad (5)$$

$$n_i \eta_{ij} = n_j \eta_{ji}$$

در نهایت مجموعه معادلات (۵) را می توان به صورت ماتریسی نوشت. تغییرات انرژی متناسب با اختلاف انرژی های مودال بوده و ماتریس سمت چپ در معادله (۶) مقارن است:

$$\omega \begin{bmatrix} (\eta_{11} + \sum_{i \neq 1} \eta_{1i}) n_1 & -\eta_{12} n_1 & \dots & -\eta_{1n} n_1 \\ -\eta_{21} n_2 & (\eta_{22} + \sum_{i \neq 2} \eta_{2i}) n_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{m1} n_m & \dots & \dots & (\eta_{mm} + \sum_{i \neq m} \eta_{mi}) n_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \\ \vdots \\ \Pi_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

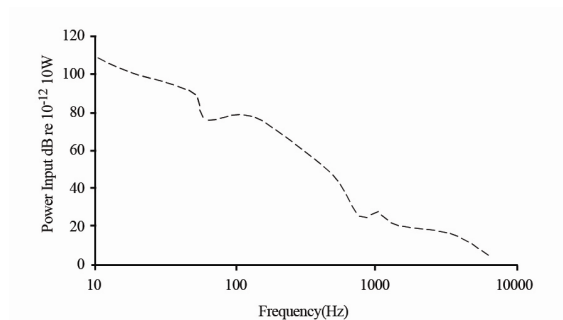
معادلات ماتریس فوق، معادلات خطی اند و امکان تحلیل سیستماتیک تعاملات بین زیرسیستم ها و مطالعه و بررسی پارامتریک متغیرها را فراهم می آورند [۹].

۳- مدل سازی و تحلیل آکوستیکی سیستم مکش هوای موتور به روش تحلیل انرژی آماری

محدوده فرکانسی عملکرد صدای سیستم مکش و صدای داخل کابین وسیع است. همچنین سیستم مکش دارای سازه پیچیده ای است و سازه سیستم مکش موتور با هوای داخل و خارج کوپل است. لذا برای بررسی رفتار آکوستیکی و اثرات کاربرد مواد متخلخل بعنوان مواد عایق صوت در سیستم مکش

هوای عبوری بر روی سطح خارجی و صوت موتور انجام شده است.

مشخصات دبی جریان هوای ورودی به دهانه سیستم مکش در سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه و بار نامی موتور از نتایج آزمایشگاهی به دست می آید که می توان آن را به صورت طیف تحریک وارد نرم افزار کرد [۱۲]. همچنین صوت موتور را نیز می توان به صورت توان ورودی اندازه گیری شده از نتایج آزمایشگاهی استخراج کرد که نمودار زیر بیانگر توان ورودی در سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه است [۱۲].

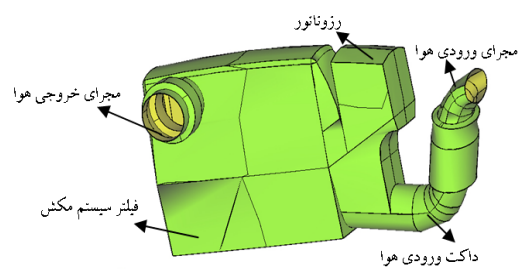


شکل (۳) توان ورودی به سیستم مکش موتور EFV [۱۲].

در مدل مذکور صوت ناشی از جریان هوای عبوری مطابق شکل (۴) به صورت منابع پراکنده صوتی مدل سازی شده است که در محل ورود هوا به مدل تحلیل انرژی آماری اعمال می شوند. تحریک منبع صوت آئرو دینامیکی نیز مطابق شکل به صورت جریان لایه مرزی آشفته^۲ برای شبیه سازی فشارهای نوسانی بر روی سطح خارجی در نظر گرفته شده اند. صوت موتور نیز به صورت توان ورودی به دهانه خروجی هوا در سیستم مکش اعمال می شود. منابع صوت سیستم مکش در شکل (۴) نمایش داده شده اند.

چون یکی از اهداف این مقاله محاسبه ضریب افت انتقال صوت سیستم مکش موتور است و این پارامتر نیز مستقل از

به صورت خودکار است. با توجه به اینکه تعداد زیرسیستم های تشکیل دهنده این مدل زیاد است، این قابلیت سبب می شود که علاوه بر صرفه جویی در زمان مدل سازی، از بروز هرگونه خطای دستی در هنگام وارد کردن اطلاعات پرهیز شود. به طور کلی مدل تحلیل انرژی آماری سیستم مکش مذکور متشکل از ۱۰۷ زیرسیستم سازه ای و ۲۱ زیرسیستم آکوستیکی است که توسط ۷۲۱ اتصال نقطه ای، خطی و صفحه ای به یکدیگر متصل شده اند. در شکل (۲) زیرسیستم های اصلی سازه ای مدل تحلیل انرژی آماری ارائه شده است.



شکل (۲) زیرسیستم های سازه ای مدل تحلیل انرژی آماری.

جنس ماده سیستم مکش موتور EFV پلی پروپیلن^۱ است. در جدول (۱) خواص فیزیکی این ماده آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی پلی پروپیلن [۱۱].

پلی پروپیلن	متغیرهای فیزیکی
۹۰۵	چگالی (kg/m^3)
۱/۷	مدول یانگ (GPa)
۶۳۰	مدول برشی (MPa)
۰/۳۵	ضریب پواسن
۰/۰۰۷	میرایی سازه

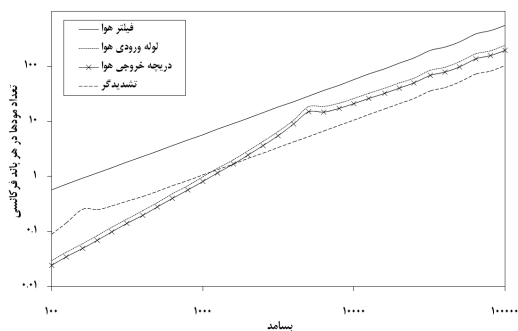
۲-۳- نحوه اعمال منابع صوت

پس از ایجاد مدل تحلیل انرژی آماری و اتصال کلیه زیرسیستم ها، مدل سازی تحریک به شکل جریان هوای مکش شده و لایه مرزی مغشوش ایده آل برای شبیه سازی جریان

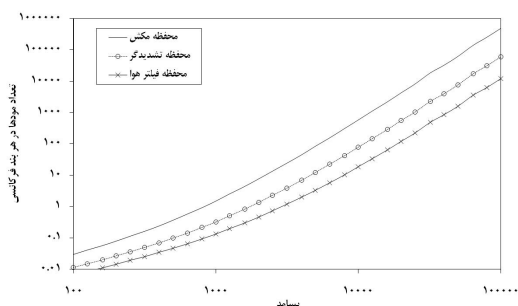
۲ - Turbulent Boundary Layer

۱ - Polypropylene (PP)

لوله ورودی هوا، فیلتر هوا، مجرای خروجی هوا) و هم برای زیرسیستم‌های آکوستیکی (از قبیل محفظه داخل مجرای ورودی هوا، فضای داخل فیلتر، فضای داخل تشدیدگر) افزایش می‌یابد و این بدان معناست که نتایج حاصل از تحلیل مدل تحلیل انرژی آماری خودرو در فرکانس‌های بالا که دارای چگالی مودال بالا است، دارای اعتبار بیشتری است.



شکل (۵) تعداد مودهای موجود در هر باند فرکانسی برای زیرسیستم‌های سازه‌ای مدل تحلیل انرژی آماری

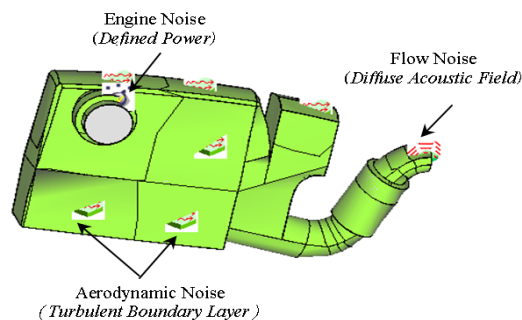


شکل (۶) تعداد مودهای موجود در هر باند فرکانسی برای زیرسیستم‌های آکوستیکی مدل تحلیل انرژی آماری.

در ادامه برای بررسی صحت نتایج، افت انتقال صوت^۲ و سطح فشار صوت^۳ در محل گوش راننده حاصل از تحلیل مدل انرژی آماری با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از تست آکوستیکی موتور EF7 در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو مقایسه می‌شود [۱۲].

شکل‌های (۷) و (۸) مقایسه بین نتایج حاصل از روش تحلیل انرژی آماری و داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. نتایج مؤید این مطلب هستند که در فرکانس‌های بالا منحنی

منابع تحریک است [۱۳]، لذا منابع تحریک به صورت ایده‌ال در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۴) منابع صوت سیستم مکش.

از حل معادلات جریان توان و بالانس انرژی بین کلیه زیرسیستم‌های موجود در مدل تحلیل انرژی آماری، طبق رابطه (۶)، پارامترهای سیستم، انرژی ورودی، توان انتقالی و توان میرایی هر زیرسیستم تعیین می‌شوند. در نهایت با تحلیل این مدل افت انتقال صوت و سطح فشار صوت در محل گوش راننده به دست خواهد آمد. لازم به ذکر است که تحلیل‌ها در بازه فرکانسی ۱۰۰ الی ۱۰۰۰۰۰ هرتز و بر اساس باند ۱/۳ اکتاو انجام شده‌اند.

۴- نتایج مدل تحلیل انرژی آماری

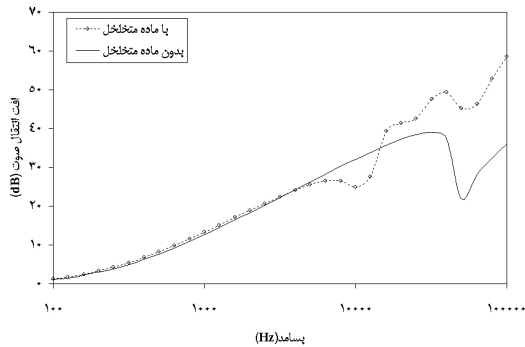
قبل از تحلیل هر مدل انرژی آماری ابتدا باید پارامترهای سیستم از قبیل چگالی مودال، ضریب اتلاف داخلی و ضریب اتلاف کوپلینگ زیرسیستم‌ها محاسبه شده و صحت‌گذاری شوند. ولی با توجه به اینکه تعداد زیرسیستم‌های مدل مذکور و در نتیجه تعداد ضرایب کوپلینگ بین زیرسیستم‌ها بسیار زیادند، در اینجا مطابق شکل‌های (۵) و (۶)، تنها نمودار تعداد مودهای موجود در هر باند فرکانسی برای تعدادی از زیرسیستم‌های اصلی سازه‌ای و آکوستیکی مدل تحلیل انرژی آماری نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فرکانس، تعداد مودهای موجود در هر باند فرکانسی هم برای زیرسیستم‌های سازه‌ای (از قبیل تشدیدگر^۱،

^۲ - Transmission Loss (TL)

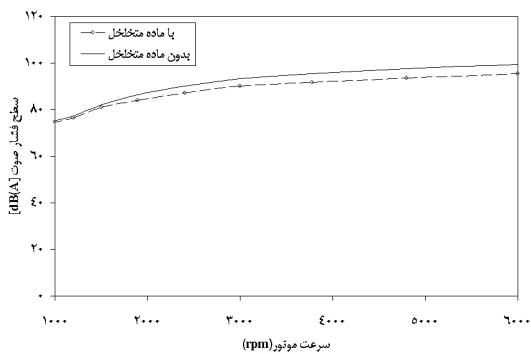
^۳ - Sound Pressure Level (SPL)

^۱ - Resonator

شکل های (۹) و (۱۰) اثر استفاده از مواد متخلخل را نشان می دهند. در این قسمت از ماده متخلخل پلی یورتان^۱ استفاده می شود که مشخصات فیزیکی مربوط به این ماده در جدول (۲) آورده شده است [۱۴].



شکل (۹) افت انتقال صوت سیستم مکش موتور با در نظر گرفتن مواد متخلخل و بدون آن.

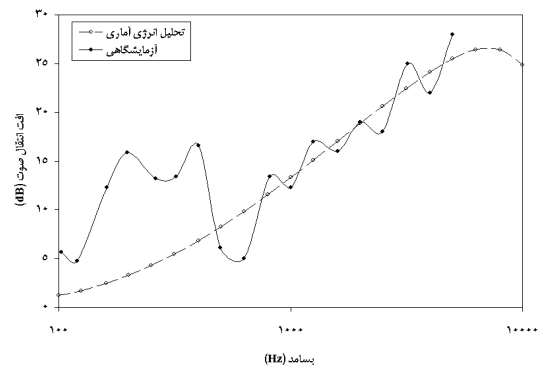


شکل (۱۰) سطح فشار صوت سیستم مکش موتور با در نظر گرفتن مواد متخلخل و بدون آن.

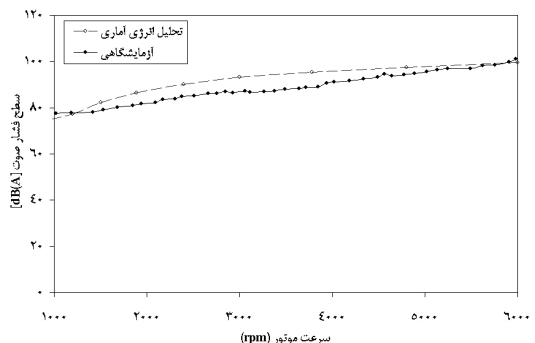
با توجه به شکل های (۹) و (۱۰) می توان دید که فرکانس های بالا در محدوده استفاده از مواد متخلخل عایق، عملکرد افت انتقال صوت را بهبود می دهد. استفاده از این مواد می تواند بطور متوسط بیش از ۲۵٪ افت انتقال صوت را مخصوصاً در محدوده فرکانس بالا افزایش دهد. از طرفی استفاده از این مواد در تمام محدوده فرکانسی سطح فشار صوت را کاهش می دهد و در مجموع سطح فشار صوت در محل گوش راننده به میزان ۴dB کاهش می یابد.

افت انتقال صوت به دست آمده از روش تحلیل انرژی آماری تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی موجود دارند. اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیل انرژی آماری در فرکانس های پایین نیز به دلیل مقادیر کم چگالی مودال زیرسیستم ها است. زیرا همان طور که پیش از این ذکر شد تنها زمانی پاسخ های حاصل از یک مدل تحلیل انرژی آماری دارای اعتبار است که چگالی مودال زیرسیستم های آن بالا باشد.

پس از صحت گذاری بر روی مدل تحلیل انرژی آماری، به بررسی اثر استفاده از مواد متخلخل عایق صوت بر روی لوله سیستم مکش موتور می پردازیم. برای این کار ابتدا با جایگزینی مواد متخلخل جاذب صوت به جای پنل های تک لایه در لوله سیستم مکش، میزان افت انتقال صوت و سطح فشار صوت در محل گوش راننده مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.



شکل (۷) مقایسه افت انتقال صوت بین نتایج تحلیل انرژی آماری و آزمایشگاهی.

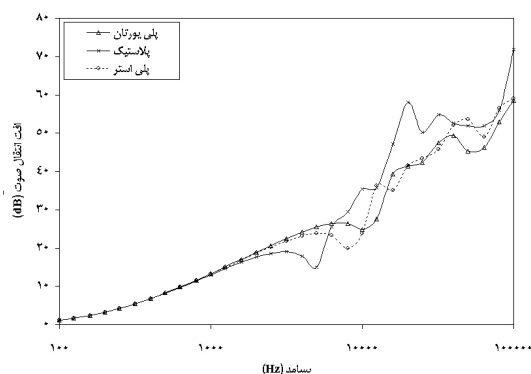


شکل (۸) مقایسه سطح فشار صوت بین نتایج تحلیل انرژی آماری و آزمایشگاهی.

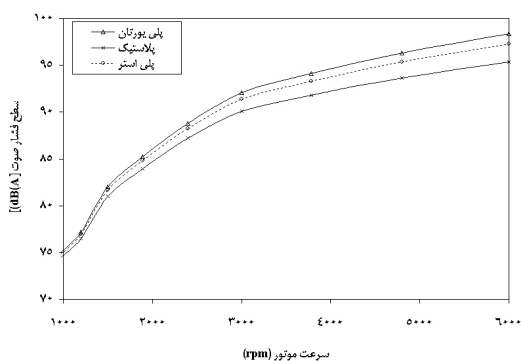
علت اینکه پارامتر مدول یانگ تنها در فرکانس‌های بالا اثرات بیشتری دارد این است که محدوده فرکانسی بالا ناحیه جرم کنترل است و تغییرات جرمی سازه در فرکانس‌های بالا به شدت بر روی افت انتقال صوت سازه اثر خواهد گذاشت. در نتیجه فوم پلیاستیک با کمترین مقدار مدول یانگ دارای بیشترین افت انتقال صوت است.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی انواع فوم‌ها [۱۴]

متغیرها	پلی استر	پلی استر	پلی یورتان
ضخامت (m)	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
تخلخل	۰/۹	۰/۹۸	۰/۹۷
مقاومت جریانی (Nm ^{-۲} s)	۲۵×۱۰ ^۴	۱۳۵×۱۰ ^۴	۸۷×۱۰ ^۴
ضریب سازه	۷/۸	۱/۷	۲/۵۲
طول مشخصه و بسکوز (m)	۲/۲۶×۱۰ ^{-۴}	۸×۱۰ ^{-۵}	۳/۷×۱۰ ^{-۵}
طول مشخصه حرارتی (m)	۲/۲۶×۱۰ ^{-۴}	۱/۶×۱۰ ^{-۴}	۱/۱۹×۱۰ ^{-۵}
چگالی (kg/m ^۳)	۳۰	۳۰	۳۱
مدول یانگ (Pa)	۸×۱۰ ^{-۵}	۵/۴×۱۰ ^{-۵}	۱/۴۳ ^{-۵}
ضریب پواسن	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳
میرایی سازه	۰/۲۶۵	۰/۱	۰/۰۵۵

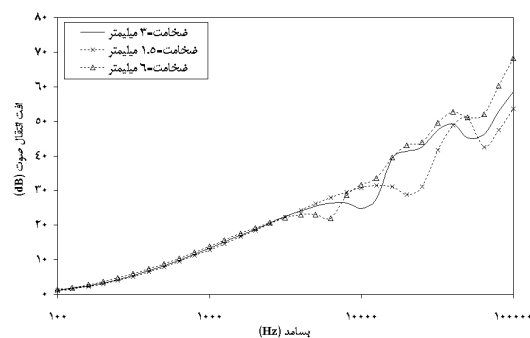


شکل (۱۳) اثر انواع فوم‌های صنعتی بر روی افت انتقال صوت.

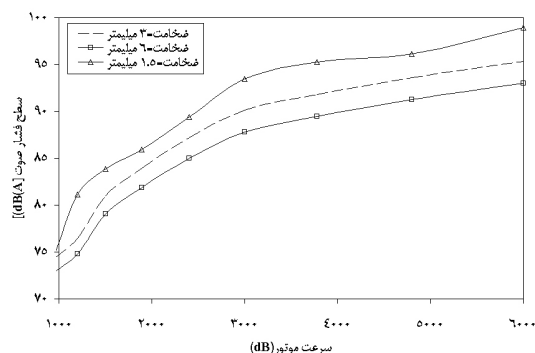


شکل (۱۴) اثر انواع فوم‌های صنعتی بر روی سطح فشار صوت.

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) اثر مثبت افزایش ضخامت ماده متخلخل بر روی افت انتقال صوت و سطح فشار صوت را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با دو برابر شدن ضخامت لایه متخلخل، افت انتقال صوت سازه به‌طور کلی به اندازه ۸٪ افزایش و سطح فشار صوت در محل گوش راننده به‌طور کلی در حدود ۳dB کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱) افت انتقال صوت سیستم مکش موتور با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت مواد متخلخل.



شکل (۱۲) سطح فشار صوت سیستم مکش موتور با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت مواد متخلخل.

در ادامه تأثیر انواع مختلف فوم‌های استفاده شده در صنعت خودرو بر روی افت انتقال صوت و سطح فشار صوت بررسی شده است. در جدول (۲) مشخصات فیزیکی مربوط به انواع مختلف این فوم‌ها آورده شده است.

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) اثر انواع مختلف فوم‌های استفاده شده را بر روی افت انتقال صوت و سطح فشار صوت نشان می‌دهند. استفاده از ماده پلیاستیک در کاهش سطح فشار صوت در فرکانس‌های بالا مؤثرتر می‌باشد. کاهش مدول یانگ موجب افزایش افت انتقال صوت در فرکانس‌های بالا می‌شود.

- [3] Dejong R. G., *Overview of Statistical Energy Analysis*, SAE Con., SEA Work Shop, 2001.
- [4] Dejong R. G, Bharj T. S. & Lee J. J., *Vehicle Wind Noise Analysis Using a SEA Model with Measured Source Levels*, SAE paper, 2001, pp. 1611-1629.
- [5] Dejong R. G., *A Study of Vehicle Interior Noise Using Statistical Energy Analysis*, SAE Paper 850960, 1985.
- [6]. Cimerman B., Bremner P., Yang Qian and Van Buskirk J. A., *Incorporating Layered Acoustic Trim Materials in Body Structural-Acoustic Models*, SAE 951307, 1995, pp. 2289-2294.
- [7] Dias T., Monaragala R. and Needham P., *Analysis of Sound Absorption of Truck spacer Fabrics to Reduce Automotive Noise*, *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, 2007, pp. 2657-2666.
- [8] Kino H., Ogasawara Y., Ito S. , Komori T., *Air Intake Duct and Manufacturing Method Therefor*, United State Patent, US 6,622,680 B2, 2003.
- [9] Delanghe Ir. K., *An Approach to Model High Frequency Vibro-Acoustic*, ISAAC7, Leuven, 1996, pp. 16-19.
- [10]. *AutoSEA2 User's Guide*, ESI Group., July 2004.
- [11] www.cctplastics.com/polypropylene.
- [۱۲] تست صوت سیستم مکش موتور EF7، موجود در مرکز تحقیقات ایران خودرو (NPD).
- [13] Steel J. A., *A study of engine noise transmission using statistical energy analysis*, *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, ProQuest Science Journals, 3, 2005, pp. 205- 213.
- [14] *AutoSEA2 Theory & Q. A. Manual*, Vibro-Acoustic Science, 2005.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر استفاده از مواد متخلخل در مجرای ورودی هوا در سیستم مکش به روش تحلیل انرژی آماری مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده می توان چنین جمع بندی کرد که استفاده از مواد متخلخل بر روی افت انتقال صوت در فرکانس های بالا بسیار مؤثر می باشد، به طوری که استفاده از این مواد می تواند بیش از ۲۵٪ افت انتقال صوت را مخصوصاً در محدوده فرکانس بالا افزایش دهد. در ضمن افت فشار صوت سیستم مکش را در حدود ۴dB کاهش می دهد.

با افزایش ضخامت فوم نیز افت انتقال صوت افزایش و سطح فشار صوت کاهش می یابد، به طوری که با دو برابر شدن ضخامت ماده متخلخل سطح فشار صوت تقریباً ۳dB کاهش می یابد. ضمناً به دلیل هزینه بالا و زمان بر بودن تستها، در صورت صحت گذاری نتایج نرم افزار می توان از آنها برای کنترل کیفیت خودرو قبل از نهایی کردن طرح استفاده کرد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از همکاری مرکز تحقیقات ایران خودرو و مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو به ویژه آقایان مهندس رستم مهرزاد و مهندس مهدی احمدی که زمینه دسترسی به اطلاعات آزمایشگاهی را فراهم نموده اند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Lyon R. H., Dejong R. G., *Theory and Application of SEA*, Butterworth-Heinemann, Second Edition, 1995.
- [2] Ohadi hamedani A., Langroudi J., *Forecast of SPL of Acoustical Cavity in High Frequency Range Using SEA*, 12th annual conference on mechanical engineering, Tehran university, Iran, 2004.