

کاهش بومینگ نویز درون کابین خودرو با استفاده از فرامواد آوایی

عباس دالوند^{*}، شهرام آزادی^ب رضا هدایتی^ب علی اصغر جعفری^ب

^آ ایران، تهران، آدرس، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، ۴۳۳۴۴-۱۹۹۱۹، دانشجوی کارشناسی ارشد

^ب ایران، تهران، آدرس، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، ۴۳۳۴۴-۱۹۹۱۹، استاد.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.dalvand@email.ac.kntu.ir

چکیده

نویز بسامد پایین، به ویژه پدیده بومینگ، یکی از چالش‌های اصلی در آسایش صوتی کابین خودرو است که جاذب‌های سنتی به دلیل نیاز به ضخامت و وزن زیاد، در کنترل آن ناکارآمد هستند. این پژوهش، یک جاذب صوتی فراماده نوین با ضخامت تنها ۱۰ میلی‌متر را بر پایه یک ساختار ترکیبی هزارتو-رزوناتور هلمهولتز، به منظور کنترل این محدوده بسامدی، طراحی و ارزیابی می‌کند. ساختار پیشنهادی با هدفگیری بسامدهای مشخص، امواج صوتی با طول موج بلند را از طریق مکانیزم‌های اتلاف ترموویسکوز به طور مؤثری جذب می‌نماید. نتایج عددی و تجربی، که از طریق آزمون لوله امپدانس صحت‌سنجی شده‌اند، نشان می‌دهد که این فرامواد قادر به دستیابی به ضریب جذب صوت بالای 0/7 در بسامدهای زیر ۳۰۰ هرتز هستند؛ عملکردی که در جاذب‌های EPDM متداول مشاهده نمی‌شود. با جانمایی این جاذب‌ها در دیواره آتش یک مدل عددی معتبر خودرو، که صحت آن با داده‌های تجربی تأیید شده است، کاهش سطح فشار صوت در موقعیت راننده به میزان ۶ الی ۱۰ دسی‌بل در محدوده بسامدی بومینگ، پیش‌بینی گردید. بنابراین، این پژوهش، راهکاری سبک و فشرده برای بهبود آسایش صوتی خودرو ارائه می‌دهد که به طور همزمان به کاهش وزن، مصرف سوخت و آلاینده‌گی نیز کمک می‌کند.

کلمات کلیدی: نویز؛ خودرو؛ فرامواد آوایی؛ جذب صوت.

1- مقدمه

کاهش نویز، ارتعاش و سختی (NVH) یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کیفیت، راحتی و قابلیت اطمینان خودرو توسط مصرف‌کنندگان به شمار می‌رود [1]. علاوه بر این، با توجه به اینکه آلودگی صوتی به‌عنوان یکی از معضلات زیست‌محیطی قرن حاضر شناخته می‌شود، کنترل آن برای حفظ سلامت جسمی و روانی سرنشینان و عابران پیاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چرا که می‌تواند منجر به عوارض جدی همچون خستگی، اختلال در خواب و تضعیف شنوایی گردد [2, 3].

بنابراین، پژوهشگران با هدف تأمین سلامت سرنشینان و ارتقای کیفیت تجربه رانندگی، در پی یافتن راهکارهایی برای کاهش نویز خودرو هستند. دو روش عمده جهت کنترل نویز کابین خودرو وجود دارد: روش فعال و روش غیرفعال. روش فعال بر مبنای استفاده از یک منبع صوتی ثانویه به‌منظور خنثی‌سازی نویز اصلی عمل می‌کند [4]. در مقابل، روش غیرفعال بر به‌کارگیری مواد آکوستیکی یا برهم‌کنش میان منبع و محیط استوار است که شامل مواد جاذب صوت، عایق‌های صوتی و فرامواد آوایی می‌شود [5]. سهولت در پیاده‌سازی و عدم نیاز به سخت‌افزارهای کنترلی پیچیده، موجب شده است که استفاده از روش غیرفعال در صنعت خودروسازی کاربرد گسترده‌ای داشته باشد [5].

پیرو این موضوع، پژوهش‌های گسترده‌ای توسط پژوهشگران بر روی مواد آکوستیکی به کار رفته در خودرو با هدف بهبود عملکرد جذب و عایق‌بندی صوتی و در نتیجه کاهش نویز داخل کابین، صورت گرفته است [6-8]. چالش اصلی در این حوزه، کنترل نویز در بسامدهای پایین است؛ زیرا کارایی مواد آکوستیکی متعارف مستلزم آن است که ضخامت ماده با کسری از طول موج صوتی، معمولاً در بازه یک‌چهارم تا یک‌دوم آن، متناسب باشد. این شرط برای بسامدهای پایین، نیازمند ضخامت‌های قابل توجهی است که عملاً کاربرد آن‌ها را محدود می‌سازد [9]. فرامواد آوایی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای این چالش مطرح شده‌اند، چرا که این مواد به واسطه ساختار هندسی پیچیده خود قادر به کنترل امواج صوتی با طول موج‌های بلند در ابعاد فشرده هستند و بدین ترتیب بر محدودیت ضخامتی مواد سنتی غلبه می‌کنند [10]. با توجه به برتری‌های فرامواد آوایی نسبت به مواد متعارف که پیشتر ذکر شد، کاربرد این ساختارها در دهه اخیر با رشد چشمگیری مواجه بوده است [11-13]. در صنعت خودروسازی، این مواد به‌منظور کنترل نویز در بخش‌های مختلفی نظیر دیواره آتش [14] (Firewall)، محفظه چرخ‌ها [15]، پشت‌سری صندلی‌ها [16] و همچنین در اینورتر خودروهای برقی [17] به‌کار رفته‌اند.

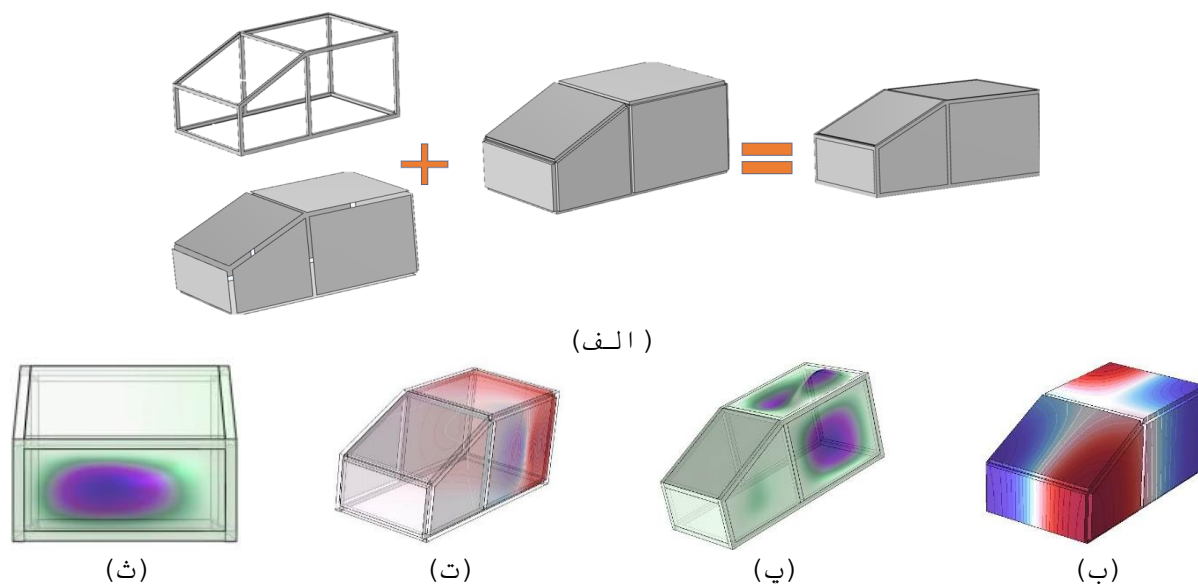
از آنجا که بخش عمده‌ای از نویز نامطلوب در کابین خودرو در محدوده بسامدهای پایین (عموماً زیر 500 هرتز) قرار دارد [18] و پدیده بومینگ (Booming Noise)، که صدایی بم و آزاردهنده است، در همین محدوده رخ می‌دهد [19]، فرامواد آوایی راهکاری مؤثر برای کنترل این حوزه بسامدی به‌شمار می‌روند. نظر به اینکه منبع اصلی نویز از موتور نشأت گرفته و مسیر اصلی انتقال آن به کابین از طریق دیواره آتش است [20]، به‌کارگیری فرامواد در این بخش به‌عنوان جاذب صوت، یک رویکرد منطقی محسوب می‌شود. نوآوری این پژوهش، استفاده از یک جاذب صوتی فراماده در مدل خودرو است که به‌طور خاص برای مقابله با بومینگ نویز در بسامدهای پایین طراحی شده است. این راهکار نه تنها سطح نویز داخل کابین را کاهش می‌دهد، بلکه به‌دلیل وزن کمتر و ضخامت

ناچیزتر نسبت به فوم‌های متداول، به کاهش وزن کلی خودرو کمک می‌کند؛ امری که به نوبه خود منجر به کاهش مصرف سوخت و سطح آلاینده‌گی می‌گردد.

در این پژوهش، در گام نخست، پدیده بومینگ نویز خودرو مطالعه شده و بسامدهای کلیدی آن از طریق مدل‌سازی عددی محاسبه می‌گردد. سپس، با هدف قرار دادن این بسامدها، یک جاذب صوتی فراماده طراحی و با بهره‌گیری از فناوری ساخت افزایشی تولید می‌شود. عملکرد آکوستیکی نمونه ساخته شده با استفاده از آزمون لوله امیدانس صحت‌سنجی شده و همچنین با ماده EPDM، که به‌عنوان عایق استاندارد در دیواره آتش محصولات شرکت سایپا به کار می‌رود، مقایسه می‌شود. در گام بعد، مدل عددی کامل خودرو از طریق مقایسه با داده‌های تجربی حاصل از اندازه‌گیری نویز درون کابین، اعتبارسنجی می‌گردد. در نهایت، جاذب فراماده طراحی شده در مدل عددی معتبر خودرو جایگذاری شده و میزان تأثیر آن بر کاهش سطح نویز کابین ارزیابی می‌شود.

2- مدل سازی خودرو

برای مدل‌سازی پدیده بومینگ نویز، یک مدل اجزای محدود ساده‌سازی شده از خودرو توسعه داده شد (شکل ۱). این مدل از دو زیرسامانه اصلی تشکیل شده است: دامنه سازه‌ای معرف بدنه فلزی (شامل تیرها و ورق‌های فولادی) و دامنه آکوستیکی معرف محفظه داخلی کابین.



شکل 1 الف) اجزای تشکیل دهنده مدل خودرو: سازه فلزی (تیرها و ورق‌ها) و محفظه آکوستیکی (ب) شکل مود اول در محفظه آکوستیکی (پ) شکل مود اول در سازه فلزی (ت) شکل مود اول در برهمکنش مودها (ث) شکل مود اول بومینگ در دیواره آتش

در مرحله نخست، تحلیل مودال به‌صورت مجزا بر روی هر یک از این دو دامنه در نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام پذیرفت تا بسامدهای طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی سازه و آکوستیکی استخراج گردد. پدیده بومینگ نویز، که به‌صورت

صدایی بم و آزاردهنده برای سرنشینان تجربه می‌شود، زمانی رخ می‌دهد که یک یا چند مود ارتعاشی سازه با مودهای آکوستیکی کابین جفت شده و موجب تشدید فشار صوتی در بسامدهای مشخصی شوند. به‌منظور شبیه‌سازی این برهم‌کنش سازه‌ای-آکوستیکی، از قابلیت چندفیزیکی نرم‌افزار برای کوپل کردن فیزیک مکانیک جامدات با فیزیک آکوستیکی استفاده شد. از طریق این تحلیل کوپله، شش بسامد اصلی بومینگ نویز در خودرو شناسایی و استخراج گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این، جهت تفکیک و شناسایی سهم دیواره آتش در ایجاد این پدیده، یک تحلیل مجزا صورت گرفت که در آن، با اعمال شرایط مرزی مناسب، سایر اجزای سازه مقید شده و تنها به دیواره آتش اجازه ارتعاش داده شد. این امر امکان محاسبه بسامدهای بومینگ ناشی از ارتعاشات این جزء خاص را فراهم آورد.

مدل عددی خودروی ارائه شده در شکل ۱، به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد فرامواد به کار گرفته شد. پیش از جایگذاری فرامواد، اعتبارسنجی مدل عددی امری ضروری است. به این منظور، فرآیند صحت‌سنجی مدل به شرحی که در ادامه می‌آید انجام پذیرفت. در شبیه‌سازی عددی، با چشم‌پوشی کردن از سایر منابع نویز نظیر نویز آیرودینامیکی و نویز تایر، و فقط با در نظر گرفتن فشار مکانیکی و صوتی موتور، یک بارگذاری ترکیبی شامل نیروی هارمونیک بر سازه و یک منبع فشار آکوستیکی، مطابق با شکل ۲-الف، به مدل اعمال گردید. شرایط مرزی مدل با مقید کردن چهار چرخ در راستاهای X و Y تعریف شد. جهت سنجش فشار صوتی داخل کابین، یک نقطه کنترلی معادل با مکان میکروفون در موقعیت گوش راست راننده در مدل تعریف شد که نتایج فشار صوتی شبیه‌سازی شده در این نقطه در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. همچنین یک لایه ماده متخلخل به‌عنوان جاذب صوت دیواره آتش پشت لایه فلزی تعبیه شده است، که اطلاعات ماده به اسم EPDM از شرکت خودروسازی سایپا گرفته شده است.

جدول 1: تشدید های مودال بر حسب هرتز

مود	محفظه آکوستیکی	سازه فلزی	بومینگ خودرو	بومینگ دیواره آتش
1	60.399	22.135	21.21	140.32
2	102.21	28.26	25.52	169.74
3	113.83	29.69	30.88	189.5
4	118.84	31.21	32.13	206.89
5	128.9	42.385	36.85	212.52
6	153.61	42.87	41.875	225.58

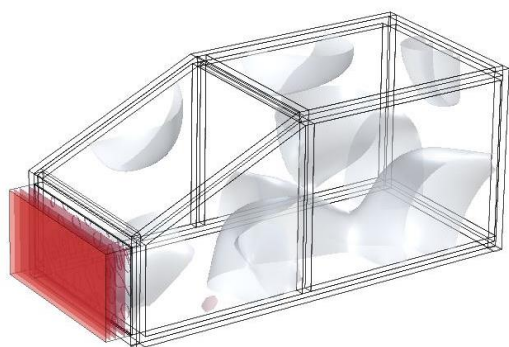
برای اعتبارسنجی این نتایج، آزمایشی مشابه بر روی خودروی واقعی پیاده‌سازی شد. یک میکروفون، مطابق با شکل ۲-ج، در موقعیت گوش راست راننده نصب و سطح فشار صوت بر حسب دسی‌بل در باندهای بسامدی یکسوم اکتاو اندازه‌گیری گردید. در نهایت، همان‌طور که در نمودار شکل ۲-د نشان داده شده است، نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده و انطباق قابل قبولی بین آن‌ها مشاهده گردید که صحت مدل عددی را برای تحلیل‌های

بعدی تأیید کرد. اختلاف مشاهده شده میان نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های مدل عددی، امری قابل انتظار است. این تفاوت عمدتاً از ساده‌سازی‌های ذاتی در فرآیند مدل‌سازی عددی نشأت می‌گیرد که در آن از بسیاری اجزای غیرسازه‌ای و پیچیده خودرو (نظیر صندلی‌ها، تودوزی‌ها، و سامانه‌های داشبورد) چشم‌پوشی شده است. با وجود این ساده‌سازی‌ها، انطباق کلی روند نمودارها و نزدیکی نتایج در بسامدهای کلیدی، اعتبار مدل را برای اهداف این پژوهش تأیید کرده و میزان اختلاف در محدوده قابل قبولی ارزیابی می‌گردد.

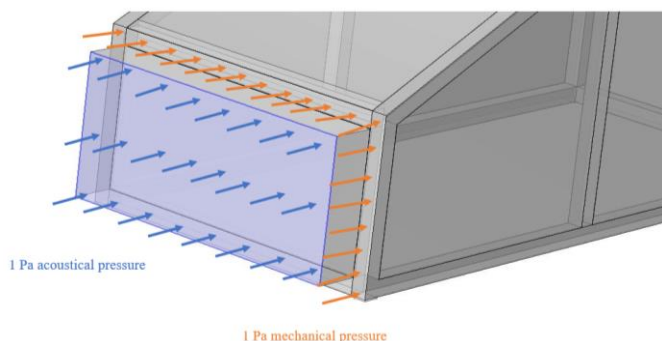
3- مدل سازی فرامواد

در این پژوهش، چهار نمونه جاذب صوتی فراماده با هدف کنترل نویز در محدوده بسامدی ۱۴۰ الی ۲۵۰ هرتز، که مطابق با تحلیل‌های پیشین به‌عنوان بازه بسامدی بومینگ نویز ناشی از دیواره آتش‌شناسایی شد، طراحی گردید. طراحی این نمونه‌ها بر اساس یک رویکرد ترکیبی، با تلفیق مفاهیم بنیادین فرامواد آوایی مبتنی بر ساختار هزارتو (Labyrinthine) و رزوناتورهای هلمهولتز صورت پذیرفت.

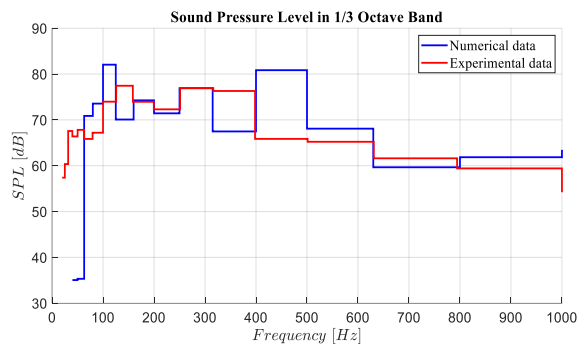
نمونه‌ها با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر در چهار نوع سلول واحد متفاوت شامل مربعی، شش‌ضلعی، درون‌رو و شش‌ضلعی درون‌رو (Re-Hex) مدل‌سازی شدند (جدول ۲) ارائه شده است. مکانیزم جذب در هر چهار ساختار، بر پایه دو مسیر هزارتوی موازی است که با مجموعه‌ای از رزوناتورهای جانبی کوپل شده‌اند. این مجموعه، همانگونه که در شکل ۳-الف نشان داده شده، توسط یک لایه رویی نازک پوشانده می‌شود. از میان چهار طرح، دو نمونه با سلول واحد مربعی و شش‌ضلعی با استفاده از فناوری ساخت افزایشی ساخته شدند (شکل ۳-ب). به‌منظور ارزیابی عملکرد آکوستیکی این نمونه‌ها، ضریب جذب صوتی آن‌ها با استفاده از یک لوله امپدانس مدل BSWA SW422 مورد آزمون قرار گرفت که شماتیک دستگاه در شکل ۳-ج قابل مشاهده است. در نهایت، عملکرد جاذب‌های فراماده با نمونه‌ای از ماده EPDM، که در حال حاضر در دیواره آتش‌خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه شد. برای این منظور، نمونه‌ای از EPDM مطابق با ابعاد استاندارد لوله امپدانس برش داده شده (شکل ۳-د) و ضریب جذب آن به‌صورت تجربی اندازه‌گیری گردید.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل 2: الف) نحوه بارگذاری بر روی مدل خودرو (ب) شماتیک صوت صفحه‌ای در خودرو (ج) آزمون عمل صوت خودرو با استفاده از میکروفون (د) مقایسه نتیجه عددی و تجربی

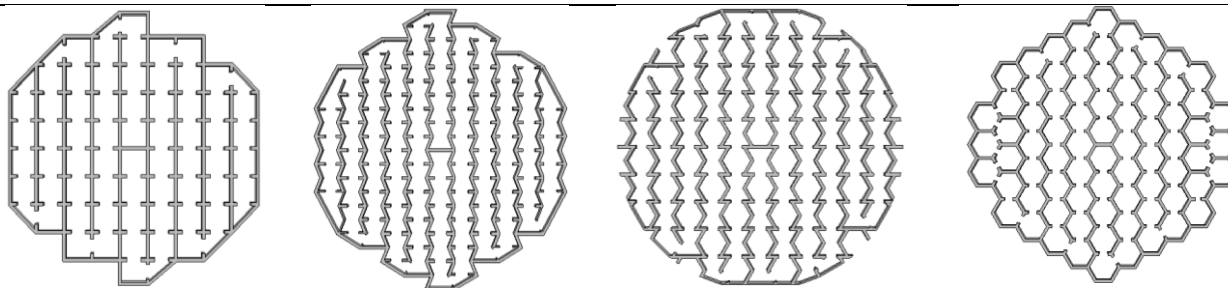
4- نتایج

ضریب جذب صوت هر چهار طرح فراماده با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم افزار COMSOL Multiphysics محاسبه گردید که نتایج حاصل در نمودار شکل 4-الف ارائه شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، ضریب جذب دو نمونه ساخته شده به صورت تجربی در لوله امپدانس اندازه‌گیری شد و همان‌طور که در شکل 4-ب نشان داده شده، نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های عددی انطباق بسیار خوبی دارند. نتایج مقایسه در شکل 4-ج ارائه شده است. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که نمونه‌های فراماده، با وجود داشتن ضخامت کمتر و وزن پایین‌تر، عملکرد جذب صوتی به مراتب بهتری در محدوده بسامدهای پایین نسبت به ماده EPDM از خود نشان می‌دهند.

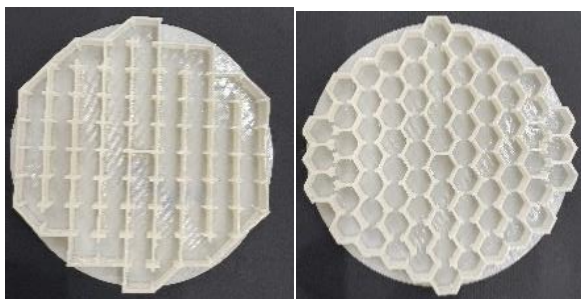
با توجه به عملکرد مؤثر جاذب‌های فراماده در محدوده بسامدهای پایین (تا ۳۰۰ هرتز)، این ساختارها به عنوان یک راهکار امیدبخش برای کاربرد در دیواره آتش خودرو ارزیابی شدند. بر این اساس، ۱۵ عدد از جاذب‌های فراماده طراحی شده در مدل عددی معتبر خودرو، در فضای میان لایه‌های EPDM دیواره آتش جانمایی گردید (شکل 4-د). سپس، مدل کامل خودرو تحت همان شرایط بارگذاری مکانیکی و آکوستیکی که در فرآیند صحت‌سنجی به کار رفت (شکل 2-الف)، مجدداً تحلیل شد. نتایج این شبیه‌سازی، که در نمودار شکل 4-ه ارائه شده است، نشان می‌دهد که جاذب‌های فراماده عملکرد بسیار مؤثری داشته‌اند. این ساختارها توانسته‌اند سطح فشار صوت در موقعیت گوش راننده را به ویژه در بسامدهای زیر ۳۰۰ هرتز، تا ۱۰ دسی‌بل کاهش دهند.

جدول 2: فرامواد مورد استفاده در پژوهش

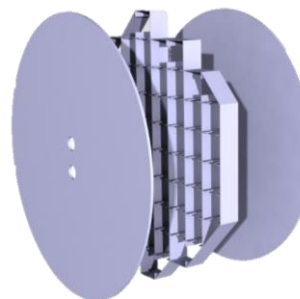
Square	Reentrant	Re-Hex	Hexagonal
--------	-----------	--------	-----------



کاهش ۱۰ دسی‌بلی نویز در محدوده بسامد پایین، بهبودی قابل توجه در آسایش صوتی کابین محسوب شده و به‌طور مستقیم بر تجربه رانندگی تأثیر مثبت می‌گذارد. این امر با کاهش خستگی ناشی از مواجهه مداوم با نویز، می‌تواند به افزایش ایمنی در حین رانندگی و همچنین کاهش ریسک آسیب‌های شنوایی در درازمدت منجر شود. علاوه بر مزایای آکوستیکی، استفاده از این فرامواد نسبت به مواد سنتی، به کاهش وزن کلی خودرو کمک می‌کند. این کاهش وزن نیز متعاقباً موجب بهبود بهره‌وری مصرف سوخت و کاهش سطح آلاینده‌های خروجی از اگزوز می‌گردد. بنابراین، راهکار ارائه شده، پاسخی به دو چالش عمده جهانی آلودگی صوتی و آلودگی هواست.



(ب)



(الف)



(د)



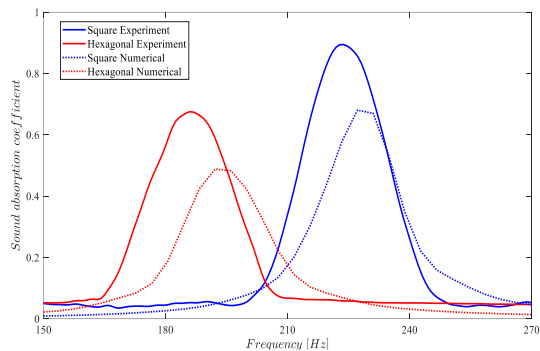
(ج)

شکل 3: الف) نحوه فرارگیری فراماده (ب) دو فراماده شش ضلعی و مربعی ساخته شده با پرینت سه‌بعدی (ج) لوله امیدانس (د) جایگذاری EPDM در لوله امیدانس جهت تعیین ضریب جذب

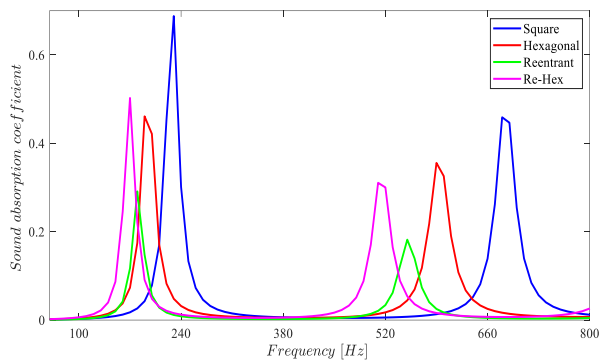
5- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک جاذب صوتی فراماده به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، مبتنی بر ساختار ترکیبی هزارتو-رزوناتور، برای کاهش نویز بسامد پایین خودرو طراحی و ارزیابی شد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که استفاده از این جاذب‌ها

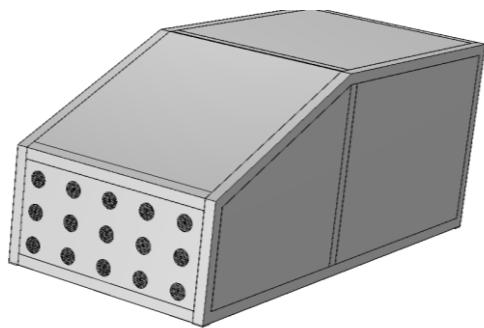
در دیواره آتش، نویز کابین را در بسامدهای زیر ۳۰۰ هرتز به میزان ۶ الی ۱۰ دسی‌بل کاهش می‌دهد. این راهکار علاوه بر بهبود آسایش صوتی سرنشینان، به دلیل وزن و ضخامت کم نسبت به جاذب‌های سنتی، به کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های خودرو نیز کمک شایانی می‌نماید. بنابراین، پژوهش حاضر راهکاری مؤثر برای مقابله همزمان با دو چالش زیست‌محیطی آلودگی صوتی و آلودگی هوا ارائه می‌دهد.



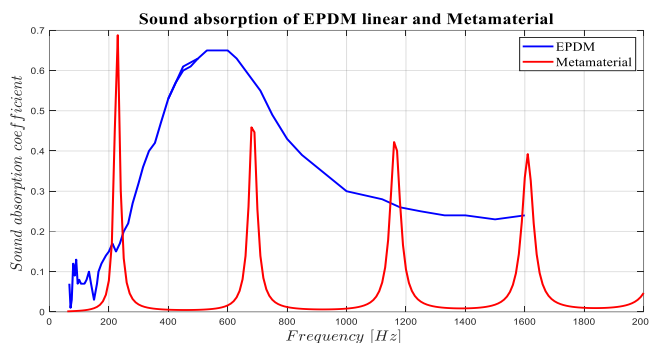
(ب)



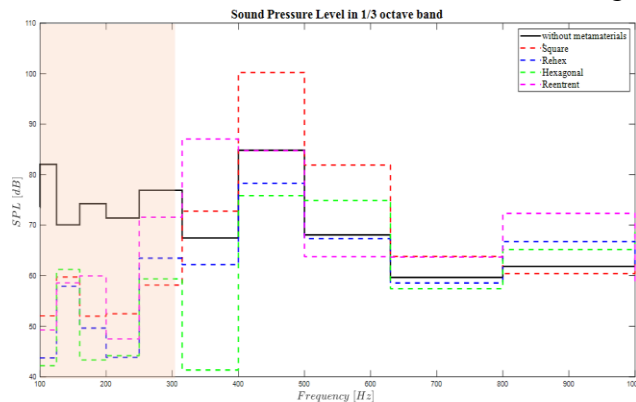
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل 4: الف) ضریب جذب محاسبه شده توسط روش عددی برای هر چهار فراماده (ب) صحنه گذاری نتایج عددی با استفاده از نتایج تست عملی لوله امپدانس (ج) مقایسه EPDM با فرامواد (د) مدل خودرو با جایگذاری فرامواد (ه) نتایج فشار صوت رسیده به گوش راننده در حالت استفاده از فرامواد

منابع

- .1 Qatu, M.S., et al., *Overview of automotive noise and vibration*. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2009. **5**(1-2): p. 1-35.
- .2 Heo, H., et al., *Acoustic metasurface-aided broadband noise reduction in automobile induced by tire-pavement interaction*. Materials, 2021. **14**(15): p. 4262.
- .3 Chen, Y., D. Li, and D. Xu. *Research on application of acoustic materials in automobile noise reduction*. in *IOP conference series: earth and environmental science*. 2019. IOP Publishing.
- .4 Samarasinghe, P.N., W. Zhang, and T.D. Abhayapala, *Recent advances in active noise control inside automobile cabins: Toward quieter cars*. IEEE Signal Processing Magazine, 2016. **33**(6): p. 61-73.
- .5 Wang, Y., H. Guo, and C. Yang, *Passive Noise Control for Vehicle*, in *Vehicle Interior Sound Quality: Analysis, Evaluation and Control*. 2023, Springer Nature Singapore: Singapore. p. 117-142.
- .6 Choudhary, S., et al., *Systematic literature review on thermal and acoustic characteristics of natural fibre polymer composites for automobile applications*. Materials Today: Proceedings, 2023.
- .7 Dunne, R.K., D.A. Desai, and R. Sadiku, *A review of porous automotive sound absorbers, their environmental impact and the factors that influence sound absorption*. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2017. **13**(2): p. 137-163.
- .8 Selvaraj, V.K. and J. Subramanian, *A comparative study of smart polyurethane foam using RSM and COMSOL multiphysics for acoustical applications: from materials to component*. Journal of Porous Materials : (2)30 .2023 ,p. 547-563.
- .9 Patil, V.S. and S. KURBET, *Automotive Noise And Vibration Control*. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology: p. 1-5.
- .10 Gao, N., et al., *Acoustic metamaterials for noise reduction: a review* .Advanced Materials Technologies, 2022. **7**(6): p. 2100698.
- .11 Kong, W., T. Fu, and T. Rabczuk, *Improvement of broadband low-frequency sound absorption and energy absorbing of arched curve Helmholtz resonator with negative Poisson's ratio*. Applied Acoustics, 2024. **221**: p. 110011.
- .12 Jonza, J., et al. *Acoustically Absorbing Lightweight Thermoplastic Honeycomb Panels*. in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2017. Institute of Noise Control Engineering.
- .13 Asgari, E., A. Ohadi, and R. Hedayati, *Multiple Broad Bandgaps Soundproofing for Sectoral Labyrinthine Metamaterials*. Extreme Mechanics Letters, 2025: p. 102349.
- .14 Chang, K.-J., et al., *An application of acoustic metamaterial for reducing noise transfer through car body panels* ,2018 .SAE Technical Paper.
- .15 Kronowetter, F., et al., *Novel compound material and metamaterial wheelhouse liners for tire noise reduction*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023. **200**: p. 110548.
- .16 Yan, Z., et al., *Study on Acoustic Characteristics of Passenger Cabin-Headrest Resonator Coupling System*. 2023, SAE Technical Paper.
- .17 Gunreddy, P.R. and M. Leamy, *Split Ring Resonator-based Metamaterial with Total Bandgap for Reducing NVH in Electric Vehicles*. 2024, SAE Technical Paper.
- .18 Kim ,S. and M. Brennan, *A comparative study of feedforward control of harmonic and random sound transmission into an acoustic enclosure*. Journal of sound and vibration, 1999. **226**(3): p. 549-571.
- .19 Ghanati, G. and S. Azadi, *Active control of vehicle's interior sound field by using multichannel H_{∞} robust controller*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020. **234**(2-3): p. 725-738.
- .20 Fu, Y. and X. Wang, *Advancements and trends in vehicle sound package for noise control: A comprehensive review*. Advances in Mechanical Engineering, 2025. **17**(6): p. 16878132251345867.