

## بررسی روش‌های اندازه‌گیری، مدل‌سازی و عوامل مؤثر بر نویز و ارتعاشات حفره تایر

### Investigation of measurement methods, modeling, and factors affecting tire cavity noise and vibration

#### چکیده

تأکید بر فضای داخلی آرام در بازار طراحی رقابتی خودرو، موضوع بسیار مهمی است. میزان نویز داخلی خودرو بر اساس نیازهای مشتری تنظیم می‌گردد و مشخصات نویز و ارتعاش خودرو، بر روی تصمیم خریدار خودرو تأثیر می‌گذارد. یکی از منابع مهم ایجاد نویز در خودرو، تایر می‌باشد که با پیشرفت و برقی شدن خودروها، بسیار اهمیت یافته و محققان در تلاش هستند تا این نویز را به حداقل برسانند. بخش مهمی از نویز تایر، مربوط به ارتعاشات داخلی موجود در حفره تایر است که نویز حفره تایر را به وجود می‌آورد. در این مقاله، روش‌هایی برای اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات در حفره تایر به منظور شناخت و بررسی این نویز و انجام تحقیق‌های بعدی بر روی آن، بیان شده است. همچنین تحقیقاتی در مورد مدل‌سازی نویز و ارتعاش حفره تایر نیز به انجام رسیده است. برای یافتن راهکارهای مناسب برای کاهش نویز حفره تایر، لازم است تا پارامترهای مؤثر بر آن، به طور کامل شناسایی و مطالعه شود و بر روی عواملی که باعث افزایش یا کاهش این نویز می‌شود، مطالعه جامعی صورت گیرد. به همین دلیل در این مقاله، پارامترهای مؤثر بر نویز و ارتعاشات حفره تایر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات به منظور شناخت نویز و ارتعاشات حفره تایر و یافتن راهکارهای لازم برای کنترل آن و انجام مطالعات بعدی ضروری است و به همین دلیل در این مقاله سعی شده است به همه ابعاد آن به طور مبسوط پرداخته شود.

کلمات کلیدی: نویز حفره تایر، عوامل مؤثر بر نویز، مدل‌سازی نویز، روش‌های اندازه‌گیری صوت، ارتعاشات خودرو، تحریک تایر

#### نوع مقاله: پژوهشی

- مجتبی مومن<sup>۱</sup>، مرتضی ملاجعفری<sup>۲\*</sup>، سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی<sup>۳</sup>
- ۱- دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی خودرو، طبقه سوم
  - ۲- دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران
  - ۳- دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

1-\*mollajafari@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰-۰۸-۳۰

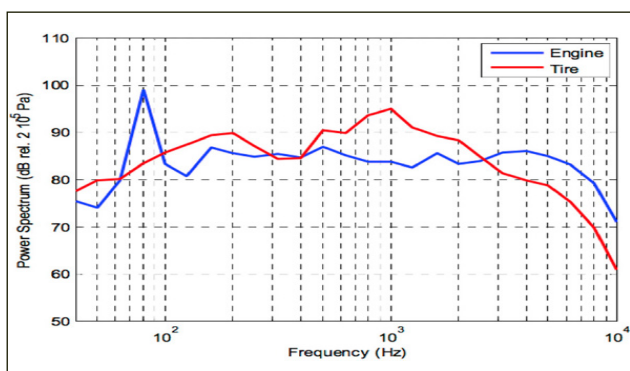
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱-۰۲-۳۰

## ۱. مقدمه

از لحاظ فیزیکی، صوت، ارتعاش مکانیکی یک محیط الاستیک گازی، مایع یا جامد است. صوت، شکلی از انرژی مکانیکی است و هنگامی که ذرات در اطراف موقعیت تعادل خود نوسان کنند تولید می‌شود. اگر این صوت، آزاردهنده باشد، به نوبت تبدیل می‌شود.

آلودگی صوتی، یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی است که به‌عنوان عاملی زیان‌آور، سلامتی انسان‌ها را به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه در معرض تهدید قرار می‌دهد. مقاله سبز کمیسیون اروپا نشان داده است که نوبت تایر و جاده غالب‌ترین منبع نوبت محیط‌زیست (بیش از ۹۰ درصد) در اروپا است و به دنبال آن نوبت حمل‌ونقل ریلی و نوبت هواپیماها و سروصداها صنعتی قرار دارد. به این ترتیب، آلودگی صوتی ناشی از حمل‌ونقل، بیش‌ازپیش نگران‌کننده است، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است [۱].

منبع اصلی نوبت، برای یک وسیله نقلیه در حال عملکرد، وجود دارد: موتور (سیستم انتقال قدرت)، سیستم ورودی، سیستم اگزوز، آشفستگی آیرودینامیکی (باد) و تعامل تایر و جاده<sup>۲</sup> سندبرگ نشان داد که نوبت تایر برای وسایل نقلیه سواری که با سرعت بالاتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت و برای کامیون‌هایی که با سرعت بالاتر از ۷۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کنند، نوبت غالب است. نوبت موتور در فرکانس‌های کم و سرعت‌های کم مشهود است که در شکل (۲) نشان داده شده است [۱].



شکل ۲. مقایسه منابع نوبت موتور و تایر [۱]

برای بررسی هر پدیده، نیاز به اندازه‌گیری و مدل‌سازی آن وجود دارد. روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای بررسی نوبت و ارتعاشات حفره تایر وجود دارد که در این مقاله به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. مدل‌سازی نوبت و ارتعاشات حفره تایر می‌تواند توسط مدل‌های نظری، مدل‌های شبیه‌سازی شده و مدل‌های تجربی انجام شود. مدل‌های ریاضی که از آن‌ها، به مدل‌های نظری یا مدل‌های تئوری نیز یاد می‌شوند، از یک سری روابط ریاضی، برای بررسی و مدل‌سازی نوبت و ارتعاشات حفره تایر استفاده می‌کنند. روش المان محدود<sup>۳</sup> (FEM)، که به‌عنوان تجزیه و تحلیل المان محدود<sup>۴</sup> (FEA) هم شناخته می‌شود، یک روش عددی برای حل مسائل به‌صورت دیفرانسیل جزئی است. FEM کل بدنه جسم، از جمله مرز اطراف آن را به قسمت‌های کوچک‌تر و ساده‌تر به نام المان



شکل ۱. نقشه نوبت استراتژیک برای دوره شبانه [۱]

نوبت، ارتعاش و سختی<sup>۱</sup> (NVH)، یک ضریب کیفیت در مهندسی خودرو است. به‌طور کلی پذیرفته شده است که پنج

1. Noise, vibration, and harshness (NVH)

2. Tire-pavement interaction

3. Finite element method (FEM)

4. Finite element analysis (FEA)

ایجاد نویز، مانند موتور، تهویه مطبوع، آگزوز و... و همچنین درک مسیرهای انتقال رایج صدا تمرکز دارند. یکی از صداهای مشکل‌ساز، نویز آکوستیک است که می‌تواند در داخل تایلر ایجاد شود و آن را نویز حفره تایلر می‌نامند. بدون نویز موتور، این صدا بسیار قابل توجه است که می‌تواند نیاز به معرفی مواد میراکننده اضافی را برای کاهش نویز انتقال یافته به همراه داشته باشد [۴].

نویز حفره تایلر منبع مهمی از صدای تایلر است. این نویز از طریق سیستم تعلیق به داخل کابین خودرو منتقل شده و صدای آزاردهنده‌ای را در داخل خودرو ایجاد می‌کند [۵]. نویز حفره تایلر نویزی است که باعث ایجاد پژواک می‌شود و مانند زنگ که باعث آزار گوش است، مدت‌هاست که به یکی از اصلی‌ترین مشکلات نویز جاده تبدیل شده است [۶].

### ۳. روش‌های اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات حفره تایلر

در شکل (۳) یک دسته‌بندی کلی از روش‌های اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات حفره تایلر ارائه شده است و در ادامه کارهای انجام شده در هر دسته، بررسی شده‌اند.

برای بررسی هر پارامتر، نیاز به اندازه‌گیری آن وجود دارد. از آنجاکه هر روش اندازه‌گیری از بعضی جنبه‌ها محدودیت‌های خود را دارد، معمولاً پیشنهاد می‌شود که از چندین سازوکار برای ارزیابی خصوصیات نویز

استفاده شود [۷]. برای بررسی هر پارامتر، نیاز به اندازه‌گیری آن وجود دارد. از آنجاکه هر روش اندازه‌گیری از بعضی جنبه‌ها محدودیت‌های خود را دارد، معمولاً پیشنهاد می‌شود که از چندین سازوکار برای ارزیابی خصوصیات نویز استفاده شود [۷].

برای پیش‌بینی نویز تعامل تایلر و جاده و بررسی تأثیر بسیاری از پارامترها و مقایسه نویز داخلی و خارجی تایلر، از اندازه‌گیری نویز حفره تایلر و درک بهتر این نویز و ارتباط آن با

محدود تقسیم می‌کند. برخلاف FEM، روش المان مرزی<sup>۱</sup> (BEM) است که فقط مرز بدنه جسم را به المان محدود تقسیم می‌کند و از نظر محاسباتی کارایی بیشتری دارد. با پیشرفت رایانه، BEM و FEM به دو تکنیک غالب عددی تبدیل شده است [۲].

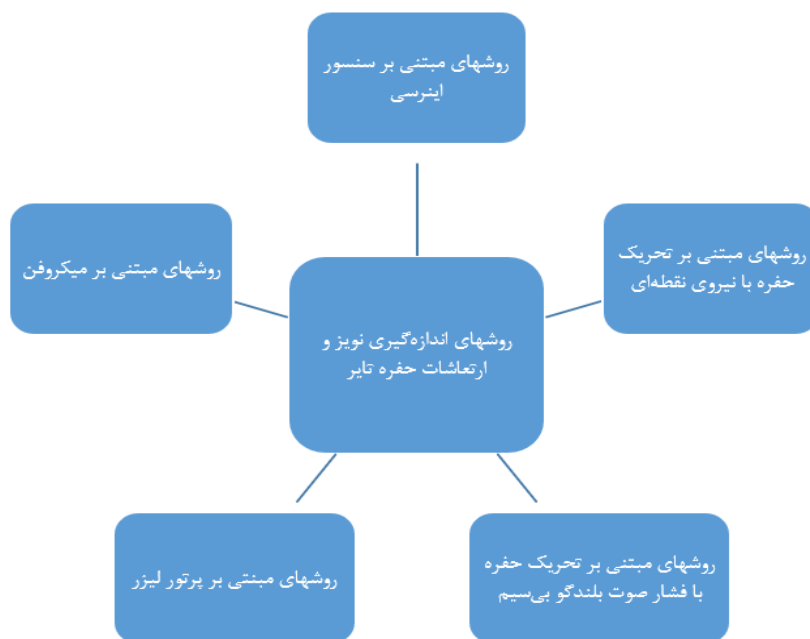
برای مسائل رزونانس حفره تایلر، مدل المان محدود برای اعتبارسنجی فرکانس‌های رزونانس، با توجه به اندازه و شکل حفره تایلر، بسیار کاربردی هستند. بیشتر مدل‌های المان محدود برای توصیف حفره تایلر به سادگی ساخته شده‌اند، تا طول مؤثر خطی که توسط امواج آکوستیکی در امتداد حفره حلقوی طی می‌شود را بکشند. برخی دیگر ترجیح می‌دهند که از شکل دقیق حفره در مدل‌سازی حفره تایلر استفاده کنند. این تفاوت‌ها اندک است و بر ویژگی‌های ارتعاش چرخ تایلر تأثیر نمی‌گذارد. مدل المان محدود حفره تایلر به تعداد المان‌های زیاد احتیاج ندارد، زیرا طبق یک قانون سرانگشتی در اکثر نرم‌افزارهای المان محدود؛ در فضای حفره آکوستیکی، تنها به حداقل شش المان در یک طول موج احتیاج است؛ بنابراین رسیدن به جواب دقیق، ساده‌تر است [۳]. یکی از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی و بخصوص ارزیابی مدل‌ها، استفاده از مدل‌های تجربی است [۲].

ساختار مقاله به صورت زیر می‌باشد. در بخش ۲ نویز حفره تایلر معرفی شده است. روش‌های اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات حفره تایلر و روش‌های مدل‌سازی نویز و ارتعاش حفره تایلر، موضوعاتی هستند که به ترتیب در بخش‌های ۳ و ۴ مورد بحث قرار گرفته‌اند. بخش ۵ به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نویز حفره تایلر و ارتعاشات داخلی آن اختصاص دارد و در نهایت مقاله در بخش ۶ با نتیجه‌گیری از تحقیقات انجام گرفته، به پایان می‌رسد.

### ۲. نویز حفره تایلر

تکنیک‌های بهینه‌سازی NVH بر روی مهم‌ترین منابع

1. boundary element method (BEM)



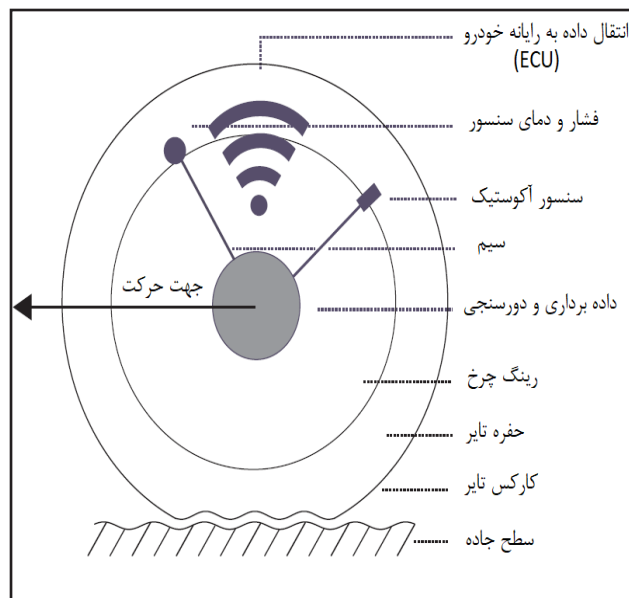
شکل ۳. دسته‌بندی روش‌های اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات حفره تایر

نویز بیرونی تایر، استفاده می‌شود که به منظور ارزیابی کیفیت صدای یک تایر ضروری است [۸].

سیستم اندازه‌گیری نویز حفره تایر<sup>۱</sup> (TCSMS) در شکل (۴) نشان داده شده است.

در این سیستم، یک سنسور آکوستیک، فشار صوت حفره داخل تایر را اندازه‌گیری می‌کند و سنسورهای دیگر، فشار و دمای استاتیک را به‌عنوان متغیرهای کنترلی، اندازه‌گیری می‌کنند. سنسورها به سیستم جمع‌آوری داده متصل به فلنج رینگ، متصل شده‌اند که داده‌ها را به کامپیوتر خودرو<sup>۲</sup> منتقل می‌کنند. کارکس تایر از طریق سطح جاده تحریک شده و بر نویز حفره تایر تأثیر می‌گذارد و با سنسور آکوستیک اندازه‌گیری می‌شود [۸].

ماسینو و همکارانش روشی برای بهبود و اتوماتیک کردن فرایند اندازه‌گیری توسط TCSMS، با قراردادن یک سنسور اینرسی، معرفی کرده است که شتاب گریز از مرکز رینگ وسیله نقلیه را ردیابی کرده و بسته به شتاب به‌دست آمده، تله‌متری موجود در رینگ چرخ را فعال یا آماده‌به‌کار می‌کند. این روش تأثیر مثبتی بر اندازه‌گیری، مصرف برق و لزوم مداخله دست در دستگاه اندازه‌گیری صدا دارد. علاوه بر فشار صدای حفره تایر، داده‌هایی از دینامیک خودرو را نیز، با استفاده از یک



شکل ۴. اجزای TCSMS [۸]

1. Tire Cavity Sound Measurement System (TCSMS)

2. Car-PC

صورت گرفته در هر دسته، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از زمان ساکاتا و همکارانش، پیشرفت‌های بسیاری در مطالعه نویز و ارتعاشات حفره تایر صورت گرفته است. برخی محققان مدل‌های نظری را برای تجزیه و تحلیل رزونانس حفره تایرها ایجاد کردند. فنگ و همکاران، محمد و وانگ، معادلات دینامیکی را برای شکل مود اول حفره تایر چرخان در شرایط بار استاتیک ایجاد کردند. نیروهای منتقل شده در جهت افقی و جهت عمودی، دو قله را در فرکانس‌هایی نشان دادند که در شرایط استاتیک تایر و هم حرکت خودرو، مستقل از هم بودند. چندین فرمول تحلیلی برای محاسبه فرکانس رزونانس حفره تایر، مانند فرمول تهیه شده توسط تامپسون، بر اساس آکوستیک موج صفحه که به صورت مدل حلقه باز بدون روکش است، فرمول تهیه شده توسط یاماچی و همکاران، با استفاده از روش ریلی ریتز و فرمول تهیه شده توسط فنگ و همکاران، با استفاده از یک مدل پدیدار شناختی ارائه شده است. چندین مدل تحلیلی کوپلینگ ساختار تایر و حفره آکوستیکی نیز برای شبیه‌سازی میدان صدا در داخل حفره یا پاسخ ارتعاش تایر، مانند مدل پوسته استوانه‌ای کوپل شده با حفره آکوستیک که توسط مولیسانی و همکاران پیشنهاد شده است، به انجام رسیده است [۵].

تامپسون با بیان معادله موج یک بعدی در یک حلقه، توانست پیک رزونانس حفره آکوستیکی را شناسایی کند [۱۰]. هریکاوا و همکارانش یک معادله موج یک بعدی ارائه کردند که موج در گردش و میرایی هوا را برای توزیع فشار صدا در داخل تایر خودرو، در نظر می‌گیرد [۱۲]. گوندا و همکارانش، یک مدل تحلیلی بهبودیافته برای رزونانس حفره تایر، با استفاده از ترکیب مدل مودال کوپل شده با اثرات ساختاری، ایجاد کردند [۱۱]. مولیسانی و همکارانش تأثیر رزونانس حفره تایر را با استفاده از یک مدل کوپلینگ ساختار و حفره هوای آکوستیکی تایر بررسی کرده‌اند [۱۳]. کائو و

سنسور اینرسی دوم در بدنه خودرو، جمع‌آوری کرده‌اند. با این سیستم توانستند داده‌های مربوطه برای نظارت بر وضعیت سطح جاده را به طور جامع و خودکار با استفاده از چندین وسیله نقلیه به دست آورند [۹].

تاناکا و همکارانش یک روش ارزیابی برای اندازه‌گیری سطح فشار صوت و شکل مودهای رزونانس حفره تایر، با استفاده از سیستم چند میکروفون<sup>۱</sup> (MMS) ارائه کردند. سیستم میکروفون حفره تایر<sup>۲</sup> (TCM) می‌تواند ناهمواری‌های سطح جاده را کشف کند. TCM، پتانسیل بالایی برای کشف ناهموار شدن سطح جاده‌ها دارند [۱۰].

در پژوهشی که توسط تاناکا و همکارانش به انجام رسید، یک روش ارزیابی برای اندازه‌گیری سطح فشار صوت و بررسی اشکال شکل مودهای رزونانس حفره تایر به طور مستقیم، با استفاده از یک MMS ارائه شده است [۹].

روش دیگر برای بررسی رزونانس حفره تایر، استفاده از سرعت‌سنج داپلر لیزری<sup>۳</sup> (LDV) برای یافتن رزونانس ارتعاشات چرخ و تایر می‌باشد. در برخی از تحقیقات، از بلندگوهای داخلی برای تحریک حفره تایر استفاده شده است، مانند کیم و همکاران و فنگ و همکاران که ایده استفاده از بلندگو بی‌سیم را برای تحریک رزونانس حفره تایر چرخان، پیشنهاد دادند.

برای انجام این کار آن‌ها یک بلندگو را در داخل حفره تایر قرار داده تا به عنوان منبع محرک فشار صدا، برای بهتر کردن ارتعاشات اجباری چرخ، در فرکانس رزونانس حفره تایر کار کند. هایشی نشان داد که تحریک با فشار صوت، بهتر از تحریک با نیروی نقطه‌ای مانند تست ضربه یا چکه، می‌تواند تایر کوپل شده را تحریک کند [۱۱].

#### ۴. روش‌های مدل‌سازی نویز و ارتعاش حفره تایر

در شکل (۵) یک دسته‌بندی کلی از روش‌های مدل‌سازی نویز و ارتعاش حفره تایر ارائه شده است و در ادامه تحقیقات

1. multi-microphone system (MMS)

2. Tire Cavity Microphone (TCM)

3. laser Doppler velocimeter (LDV)



شکل ۵. دسته‌بندی کلی از روش‌های مدل‌سازی نوین و ارتعاش حفره تاینر

فرکانس طبیعی دو شکل مود آکوستیکی (افقی و عمودی) برای تاینر تغییر شکل یافته با استفاده از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند [۱۱].

$$\begin{cases} f_1 = \frac{c}{l_c + (1-m)l_{cp}} \\ f_2 = \frac{c}{l_c - (1-m)l_{cp}} \end{cases} \quad (2)$$

تامپسون نسبت  $m$  را که نرخ سطح مقطع تاینر بدون تغییر شکل نسبت به سطح مقطع تاینر تغییر شکل یافته در محل تماس تاینر با زمین است، معرفی می‌کند. لازم به ذکر است که رابطه  $f_1 < f_c < f_2$  بین آن‌ها برقرار است [۱۱].

تامپسون برای تاینر با مشخصات 185/65R15 در شرایط بدون بار و بدون چرخش، فرکانس رزونانس شکل مود اول حفره تاینر را مقدار ۲۳۹/۵ هرتز از رابطه (۱) به دست آورد.

بولتون، با در نظر گرفتن باند آج به عنوان یک حلقه دوبعدی دارای امواج خمشی و طولی، مدل کوپلینگ ساختار و حفره هوای آکوستیک تاینرها را ارائه دادند [۱۴]. دنیل و همکارانش مدل موج‌بر را برای یافتن فرکانس طبیعی حفره تاینر غلطان و پارگذاری شده معرفی کردند [۴].

ژانگ و همکارانش از یک مدل سیال معادل، به عنوان ماده جاذب صدا استفاده کرده و رزونانس حفره تاینر روکش شده را با استفاده از آنالیز مقادیر ویژه مختلط، با توجه به شرایط مرزی مشخص، به دست آوردند و از این مدل برای ارزیابی تأثیر مواد جاذب صدا بر روی رزونانس حفره و دستورالعمل‌های مربوط به انتخاب نوع و ضخامت مواد جاذب استفاده کردند [۵].

فرکانس طبیعی رزونانس حفره تاینر بدون تغییر شکل از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۱].

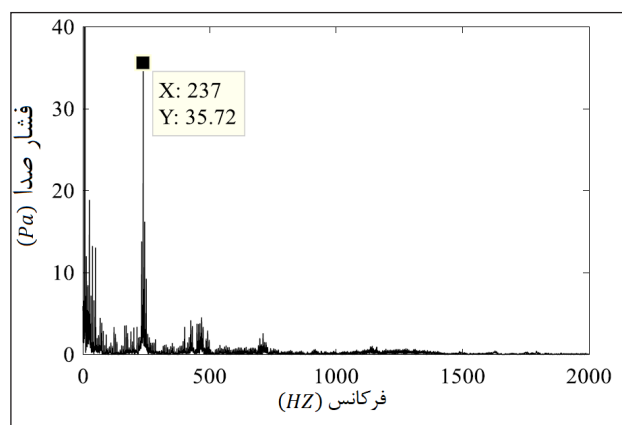
$$f_i = i \frac{c}{l} \quad (1)$$

کیم و همکاران، یک مدل المان محدود از تایر را با توجه به کپلینگ حفره آکوستیکی ایجاد کرده و براین اساس، تأثیر پارامترهای ساختاری تایر بر روی فرکانس رزونانس حفره آکوستیکی را مورد مطالعه قرار دادند. تاناکا و همکاران، یک تحریک با محدوده فرکانس بالا را بر روی تایرهای ایستا، برای شبیه‌سازی اثرات ناهمواری سطح جاده، با استفاده از یک MMS اعمال کردند. براین اساس، توزیع فشار صدا در حفره آکوستیکی و فرکانس رزونانس حفره آکوستیکی، مورد بررسی قرار گرفت [۱۷].

گوندا و همکارانش مدل کپل شده رزونانس حفره تایر را با استفاده از مدل‌های المان محدود تایر تغییر شکل یافته و مش‌بندی حفره بدون تغییر شکل، مورد ارزیابی قرار دادند. یاماچی و آکیوشی از نخستین کسانی بودند که با استفاده از مدل‌های المان محدود، بهبود اثر رزونانس حفره را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک روش کنترل صدا را به منظور از بین بردن تحریک عمودی، با روش تغییر سیستم آکوستیکی تایر پیشنهاد کرده و با استفاده از FEM و آزمایش‌ها، تأیید کردند [۱۱]. گوندا و همکارانش مدل کپل شده رزونانس حفره تایر را با استفاده از مدل‌های المان محدود تایر تغییر شکل یافته و مش‌بندی حفره بدون تغییر شکل، مورد ارزیابی قرار دادند. یاماچی و آکیوشی از نخستین کسانی بودند که با استفاده از مدل‌های المان محدود، بهبود اثر رزونانس حفره را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک روش کنترل صدا را به منظور از بین بردن تحریک عمودی، با روش تغییر سیستم آکوستیکی تایر پیشنهاد کرده و با استفاده از FEM و آزمایش‌ها، تأیید کردند [۱۱].

یی و همکارانش مدل المان محدود یک تایر کپل شده با محیط آکوستیکی در حفره تایر را ساخته و با آزمایش‌ها تأیید کردند [۱۸]. بولتون و همکارانش شبیه‌سازی یک سیستم کپلینگ ساختار و حفره هوای آکوستیک تایر را به منظور

مقدار دامنه فشار صدا برای این فرکانس، که نتیجه آزمایش بر روی تایر غیرچرخان و بدون بار است، مقدار ۳۵/۷۲ پاسکال را نشان می‌دهد که در طیف فرکانسی شکل (۶) قابل مشاهده است [۱۰].



شکل ۶. طیف فرکانسی دامنه فشار صدای حفره تایر غیرچرخان و بدون بارگذاری [۱۰]

چندین محقق با استفاده از FEM، نويز ساختار و حفره تایرها را مورد مطالعه قرار دادند. ناکنورست و استورف تا پایان قرن بیستم، مروری کامل درباره مدل‌های عددی تایرهای موجود ارائه دادند. آن‌ها تحلیل عددی معمولی را برای محاسبه ارتعاش و نويز تایر، که شامل استفاده از مدل‌های المان محدود، برای به دست آوردن ارتعاش سطح تایر در ابتدا بود را بررسی کردند و به دنبال آن یک محاسبه برای شناخت صدای رزونانس، با استفاده از هر دو مدل المان محدود و المان‌های مرزی انجام دادند. روش لاگرانژی - اوپلری نیز به عنوان یک راهکار مناسب برای تحلیل چرخش تایر مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. بیشتر مدل‌های المان محدود برای توصیف حفره تایر با توجه به طول خطی مؤثر که توسط امواج آکوستیکی در امتداد مجرای حلقوی طی می‌شود ساخته شده‌اند، در حالی که برخی دیگر ترجیح می‌دهند از شکل دقیق حفره در مدل‌سازی پیشرفته استفاده کنند [۱۶].

بررسی مکانیزم ایجاد نویز ناشی از آن، مورد بررسی قرار دادند [۱۵].

برخی از محققان بر تجزیه و تحلیل تجربی متمرکز شده‌اند. بسیاری از محققان، دو قله رزونانس را درون کابین خودرو پیدا کردند. هایشی، روش وارد کردن یک نویز تصادفی را به طور مستقیم به داخل تایر، برای مطالعه مکانیزم کوپلینگ مورد بررسی قرار داد [۱۶]. جسوپ و بولتون با استفاده از میکروفن، شکل مود رزونانس حفره آکوستیکی، که باعث انتشار صدا از ارتعاش سطح تایر می‌شود را تشخیص دادند. آن‌ها توانستند با استفاده از ارتعاش سنج لیزری و میکروفون در آزمایش‌های جداگانه، شکل مود آکوستیکی حفره تایر را (از نمای بیرون) بدست آورند [۱۱]. یی و همکارانش به منظور ارزیابی مدل تایر کوپل شده با محیط آکوستیکی ساخته شده در مدل‌سازی، تست آنالیز مودال ساختاری تایر و تست آنالیز مودال آکوستیکی یک حفره آکوستیک را انجام دادند [۱۸]. هیو و همکارانش، آزمایش و آنالیز میدان صدا در حفره تایر چرخان را از طریق یک سنسور فشار آکوستیکی طراحی شده، که به صورت ثابت بر روی سطح داخلی تایر قرار گرفته است انجام داده و مشخصات توزیع و فرکانس میدان صدا را از طریق پردازش سیگنال‌های فشار صدای به دست آمده در حفره تایر بررسی کردند [۱۰].

کینگ و همکاران، یک سری آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری نویز، در اثر تماس تایر و جاده بر حسب تغییر سرعت خودرو و فشار باد تایر انجام دادند. از این آزمایش، فرکانس‌های مودال رزونانس آکوستیکی افقی و عمودی در فرکانس‌های ۲۲۰/۷ و ۲۲۷/۶ هرتز مشخص شدند. سکاووزو و همکاران و دوویل و همکاران آزمایش‌هایی را با استفاده از اسکن ارتعاش سنج داپلر لیزری انجام داده و رزونانس حفره هوای تایر را شناسایی کردند. در این مطالعه، روش‌های انتقال نیروی رزونانس، برای شناسایی سهم مود رزونانس حفره، در ارتعاش تعلیق معرفی

شد [۱۱].

## ۵. تأثیر پارامترهای مختلف بر نویز حفره تایر و

### ارتعاشات داخلی

در شکل (۷) یک دسته‌بندی کلی از عوامل مؤثر بر نویز حفره تایر ارائه شده است و در ادامه کارهای انجام شده در هر دسته، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

به گفته بک و همکاران حداکثر تأثیر تغییر ساختار تایر از جمله تغییر ترکیب تایر برای تبدیل تایر از تایر تابستانی به زمستانی تقریباً ۳ دسی‌بل است. این که تایر درپوش<sup>۱</sup> داشته باشد یا نداشته باشد، بر نتایج تأثیر نمی‌گذارد. همچنین مشخص شد که زاویه کورد<sup>۲</sup> در کارکس یا بلت<sup>۳</sup> تأثیر چندانی ندارد [۱۹].

محمد و وانگ، فرکانس‌های رزونانس حفره را در اندازه‌های مختلف تایر و رینگ، با استفاده از رابطه تحلیلی زیر به دست آورده‌اند [۲۰].

$$f = \frac{2i c}{\pi(D_o - D_i)} \quad i = 0, 1, 2, \quad (3)$$

که در آن  $c$  سرعت صوت در هوای داخل حفره،  $i$  عدد شکل مود حفره،  $D_o$  و  $D_i$  به ترتیب قطر داخلی و بیرونی حفره تایر است.

با افزایش قطر تایر، نویز و همچنین زاویه حمله آن کاهش می‌یابد و موجب تأثیرگذاری کمتر ضربه به آج می‌شود. محمد و همکارانش نتیجه گرفتند که افزایش قطر تایر باعث کاهش فرکانس رزونانس حفره آکوستیکی تایر می‌شود. پی و همکارانش گزارش دادند که افزایش شعاع کمر بند یا آج تایر، باعث کاهش ارتعاشات تایر می‌شود. اوپلریش گزارش داد که توان صوت با شعاع تایر (a) به صورت زیر ارتباط دارد [۱۹].

$$P \propto \frac{1}{a^3} \quad (4)$$

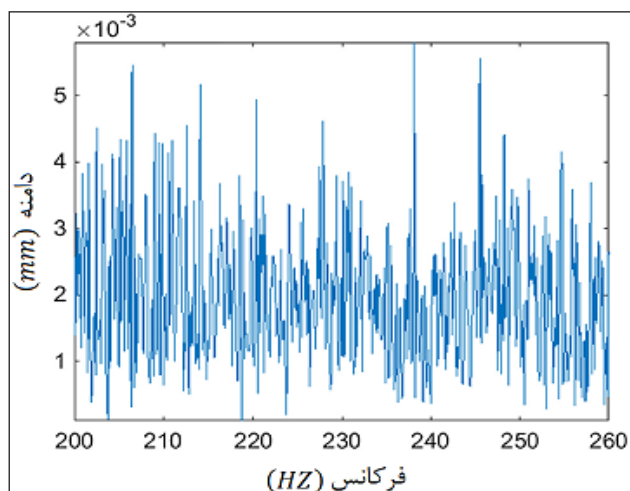
دنیل و همکارانش در جدول زیر، ارتباط مشخصات ابعادی

1. cap ply  
2. cord

3. belt



یی و همکارانش از مدل یک‌چهارم خودرو استفاده کرده و شبیه‌سازی طیف اثر ناهمواری‌های جاده در رنج فرکانس ۲۰۰ تا ۲۶۰ هرتز را برای خودرویی که با سرعت ۷۲ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند، به صورت شکل (۸) به دست آورده است [۱۸].



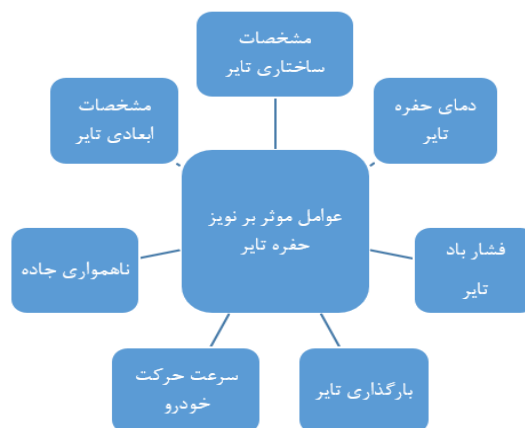
شکل ۸. منحنی شبیه‌سازی طیف اثر ناهمواری‌های جاده [۱۸]

به‌طورکلی هنگامی که فشار باد تایرها افزایش می‌یابد، استحکام تایرها افزایش می‌یابد و توانایی تایر در مقاومت در برابر تغییر شکل تقویت می‌شود، بنابراین اثر زبری جاده کمی کوچک‌تر می‌شود [۱۸].

پینای و همکارانش، تأثیر سرعت رانندگی و زبری سطح جاده در طیف نویز حفره تایر برای یک تایر زمستانی در فشار باد ۲/۵ بار، بار روی تایر ۳۶۰۰ نیوتن و دمای حفره هوای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، در شکل (۹) نشان داده شده است [۸].

با مشاهده نمودار نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش سرعت یا افزایش زبری جاده، سطح فشار صوت نویز حفره تایر به میزان‌های متفاوت در فرکانس‌های مختلف، افزایش می‌یابد. در محدوده فرکانس رزونانس اول و فرکانس‌های بالای ۱۵۰۰ هرتز، تأثیر سرعت و در محدوده فرکانس‌های رزونانس دوم تا چهارم، تأثیر زبری جاده بیش‌تر می‌گردد. پینای و همکارانش

تایر با فرکانس اولین شکل مود حفره تایر را در دستگاه‌های مختصات دکارتی و استوانه‌ای آورده‌اند [۴].



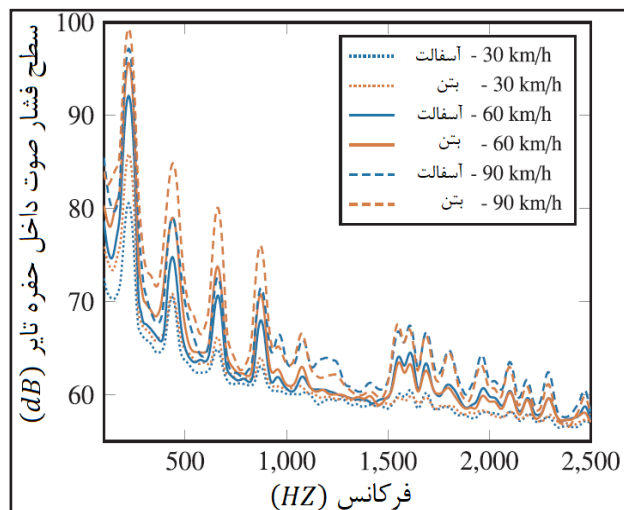
شکل ۷. تأثیر پارامترهای مختلف بر نویز حفره تایر و ارتعاشات داخلی

جدول ۱. فرکانس اولین شکل مود حفره تایر در دستگاه‌های مختصات [۴]

سایز تایر	مدل‌های دکارتی (HZ)	مدل‌های استوانه‌ای (HZ)	خطا (%)
175/70R14	228.36	230.67	-1.00
165/60R14	240.17	241.96	-0.74
195/70R15	210.98	213.22	-1.05
195/50R15	228.17	229.68	-0.66
205/55R16	210.31	211.87	-0.74
215/65R16	199.91	201.92	-1.00
195/45R16	220.95	222.07	-0.50
235/65R17	186.78	188.73	-1.04
205/40R17	212.50	213.37	-0.41
235/60R18	182.51	184.10	-0.86
225/40R18	199.53	200.40	-0.44
255/35R19	190.92	191.68	-0.39

در سرعت‌های بالاتر این تأثیرات محسوس‌تر می‌شود. افزایش سرعت حرکت خودرو باعث افزایش تحریک حفره تایر در هر زمان شده و بنابراین با افزایش سرعت حرکت خودرو، حداکثر دامنه فشار صدا افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که حداکثر دامنه فشار صدا برای تایر چرخان در موقعیت ۱۵۰ درجه حفره تایر اتفاق می‌افتد که برای نمونه توزیع دامنه فشار صدا برای بارگذاری مختلف تایر، در شرایط فشار باد تایر ۲/۲ بار و سرعت حرکت خودرو ۶۰ کیلومتر بر ساعت، برحسب موقعیت‌های متفاوت حفره هوای آکوستیکی تایر به صورت شکل (۱۰) به دست آمده است.

از شکل (۱۰) نتیجه‌گیری می‌شود که دو قله و دو فرورفتگی در حفره هوای آکوستیک وجود دارد که دو قله، مربوط به موقعیت‌های بالا و محل تماس تایر با زمین و دو فرورفتگی، مربوط به محل‌های سمت راست و چپ تایر است که نتایج شبیه‌سازی‌ها هم به همین صورت است. همچنین تغییرات فشار باد تایر و سرعت حرکت خودرو به صورت جداگانه، همین نتایج را به صورت کیفی در موقعیت‌های مختلف حفره تایر به وجود می‌آورد. دلیل افزایش نویز با افزایش بارگذاری تایر این است که افزایش بار روی تایر، منجر به بزرگ‌شدن محل تماس تایر با زمین شده و ناحیه‌ی تحریک ورودی افزایش می‌یابد، و هوای محیط تایر فشرده می‌شود، به عبارت دیگر ناحیه انتقال انرژی و سفتی تایر افزایش می‌یابد و به همین خاطر انرژی وارد شده برای تحریک رزونانس حفره نیز افزایش می‌یابد که عامل افزایش ماکزیمم دامنه فشار صدا در حفره تایر است. طبق تحقیقات موجود، شکل مود اول رزونانس حفره آکوستیکی در شرایط تایر بارگذاری شده، به دلیل از بین رفتن تقارن تایر در محل تماس با زمین، به دو فرکانس مختلف تقسیم می‌شود که یکی در فرکانس بالاتر از فرکانس شکل مود حفره آکوستیکی در شرایط بدون بار (شکل مود عمودی) و دیگری

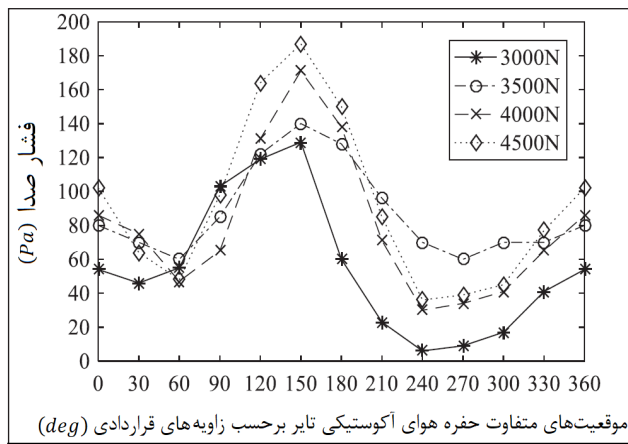


شکل ۹. تأثیر سرعت حرکت خودرو و زبری جاده بر نویز حفره تایر [۸]

دریافتند که بار روی تایر در فرکانس‌های بالای نویز حفره تایر و فرکانس بالاتر از ۱۵۰۰ هرتز، تأثیرگذارتر است. در محدوده فرکانس بالای ۱۵۰۰ هرتز، به خاطر چگالی مودال بالا، ناشی از ترکیب شکل مودهای محوری، نامتقارن و شعاعی، به نظر می‌رسد که افزایش بار تایر باعث کاهش فرکانس رزونانس (تقریباً به‌ازای هر ۱۲۰۰ نیوتن بارگذاری، فرکانس رزونانس به‌اندازه ۷ هرتز کاهش می‌یابد) می‌شود. با افزایش بار از ۲۴۰۰ نیوتن به ۴۸۰۰ نیوتن شدت رزونانس شکل مود اول حفره تایر به دلیل تحریک بیشتر، به‌اندازه ۳ دسی‌بل افزایش می‌یابد. پس با افزایش بارگذاری، شدت رزونانس یا دامنه سطح فشار صوت زیاد و در فرکانس بالای ۱۵۰۰ هرتز، فرکانس رزونانس‌ها کم می‌شود [۸].

هیو و همکارانش با انجام تست تأثیر هم‌زمان بار روی تایر، فشار باد تایر و سرعت حرکت خودرو را بر حداکثر دامنه فشار صدای حفره تایر مورد بررسی قرار داده که نتایج آن در جدول (۲) مشاهده می‌شود [۱۰].

از جدول (۲) نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش بارگذاری تایر و سرعت حرکت خودرو همواره نویز حفره تایر افزایش می‌یابد و در فشار باد ۲/۲ بار بیشترین نویز حفره تایر را داریم.



شکل ۱۰. تأثیر بارگذاری تایر بر توزیع دامنه فشار صوت در موقعیت‌های مختلف تایر [۱۰]

جدول ۲. حداکثر دامنه فشار صدا برحسب پاسکال به دست آمده از نتایج آزمایش [۱۰]

سایز تایر	مدل‌های دکارتی (Hz)	مدل‌های استوانه‌ای (Hz)	خطا (%)
175/70R14	228.36	230.67	-1.00
165/60R14	240.17	241.96	-0.74
195/70R15	210.98	213.22	-1.05
195/50R15	228.17	229.68	-0.66
205/55R16	210.31	211.87	-0.74
215/65R16	199.91	201.92	-1.00
195/45R16	220.95	222.07	-0.50
235/65R17	186.78	188.73	-1.04
205/40R17	212.50	213.37	-0.41
235/60R18	182.51	184.10	-0.86
225/40R18	199.53	200.40	-0.44
255/35R19	190.92	191.68	-0.39

پایین‌تر از آن (شکل نمود افقی) با اختلاف ۹۰ درجه، قرار می‌گیرد. در شکل نمود افقی، بیش‌ترین و کمترین میزان فشار صدا در راستای x (افق) و در شکل نمود عمودی در راستای Z (عمود) است. اختلاف فرکانس بین فرکانس‌های شکل نمود عمودی و افقی، با افزایش سرعت حرکت خودرو افزایش می‌یابد و پدیده تقسیم فرکانسی واضح‌تر می‌گردد. این تغییر فرکانس‌ها، احتمالاً در اثر تغییر فاصله مرکز دیسک چرخ تا وزن سطح مقطع حفره آکوستیک، ناشی از چرخش تایر ایجاد می‌شود [۱۰].

گالری و همکارانش دریافتند که دلیل پدیده تقسیم فرکانسی، وجود بار روی تایر و سرعت حرکت خودرو نیست، بلکه، پدیده تقسیم فرکانسی به‌خاطر وجود هوا در حفره تایر است که تحت تأثیر بار و سرعت خودرو قرار می‌گیرد. یعنی با تغییر سیال داخل حفره تایر این پدیده از بین می‌رود [۲۱]. هیکل در پژوهشی نشان داد که توان صوت، با بار تایر به توان،  $\frac{1}{3}$  ارتباط دارد. بار تایر می‌تواند بر اندازه، شکل و توزیع فشار محل تماس تایر با زمین تأثیر بگذارد. به‌طور کلی نتیجه‌گیری شد که هرچه بارگذاری و سطح محل تماس تایر با زمین بیشتر شود، مقدار پیک فشار صدا کمی افزایش می‌یابد. بار روی تایر همچنین افزایش ناچیزی در فرکانس

طبیعی نویز حفره هوای آکوستیک تایر دارد [۱۹]. تاناکا و همکارانش تأثیر تغییر شکل تایر بر میزان فشار صدا در داخل تایر را در اطراف فرکانس رزونانس اول حفره، در محدوده ۱۸۰ تا ۲۸۰ هرتز بررسی کردند. هنگامی که تفاوت بین فرکانس‌های شکل نمود عمودی و افقی زیادتر بشود، سطح فشار صوت در محدوده فرکانس‌های بزرگ افزایش خواهد یافت [۲۲].

به گفته تانگ و همکاران، تأثیر فشار باد تایر بر نویز حفره آکوستیکی تایر کم است، اما بی و همکارانش نتیجه گرفتند که تأثیر قابل توجهی بر مقدار پیک فشار صدا و تأثیر کمی در توزیع فشار صدا دارد و آن‌ها را افزایش می‌دهد. باین‌حال، فرکانس‌های رزونانس حفره آکوستیک تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند، مگر اینکه تغییر فشار باد منجر به کاهش تماس تایر با سطح زمین شود. زیرا آن‌ها به هندسه حفره هوا و سرعت صوت وابسته هستند. اولریش گزارش داد که رابطه توان صوت P با فشار باد تایر بصورت زیر است [۱۸ و ۱۹].

$$P \propto p_s^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

سرعت‌های کم ندارد. در سرعت‌های بالاتر، با افزایش فشار باد تایر، سطح فشار نويز حفره تایر یا شدت رزونانس حفره، بالاتر می‌رود.

همان‌طور که دیده می‌شود، تأثیر فشار باد، در فرکانس‌های مختلف متفاوت است و نمی‌توان یک نتیجه‌گیری کلی را گرفت. تأثیر فشار باد تایر بر فرکانس رزونانس شکل مود اول، اندک است و به‌ازای افزایش هر ۱ بار فشار باد تایر، فرکانس رزونانس به‌اندازه ۱ هرتز افزایش می‌یابد [۸].

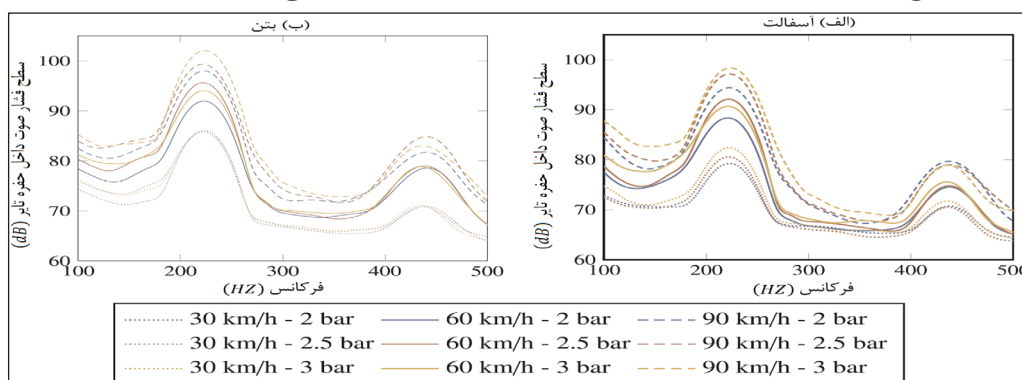
بی و همکارانش، تأثیر هم‌زمان تغییر فشار باد و بارگذاری تایر را بر توزیع فشار صدای حفره تایر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای انجام این کار، دو نقطه مرجع در محیط حفره آکوستیکی در نظر گرفته که نقطه ۱ در محل تماس تایر با زمین و نقطه ۲ در موقعیت چپ تایر است و در ۴ وضعیت مختلف از نظر شرایط بارگذاری و فشار باد تایر، شبیه‌سازی انجام داده و نتایج را در شکل (۱۲) آورده‌اند [۱۸].

کنت و همکاران، تأثیر دمای تایر را بر روی رزونانس عمودی ساختاری تایر بررسی کرده و دریافت که فرکانس رزونانس، با افزایش دمای تایر، ۰/۱۲ هرتز بر درجه سلسیوس کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل تغییر خاصیت ویسکوالاستیک مواد تایر است. همچنین بیان کرد که فرکانس رزونانس آکوستیک حفره تایر، با افزایش دما، ۰/۱۶ هرتز بر درجه سلسیوس افزایش می‌یابد [۱۹].

هیو و همکارانش و همچنین تانک و همکاران، دریافتند که با افزایش فشار باد تایر، چگالی و مدول بالک محیط آکوستیکی تایر افزایش‌یافته و سفتی تایر و توانایی تایر در برابر تغییر شکل افزایش می‌یابد، بنابراین پاسخ تایر تحت تحریک ناهمواری‌های جاده، مقاوم‌تر است؛ همچنین محل تماس تایر با زمین یا ناحیه ورودی انرژی تحریک، کاهش یافته و متعاقباً، انرژی دریافتی برای تحریک رزونانس حفره، با افزایش فشار باد، در ابتدا افزایش و با عبور از فشار باد ۲/۲ بار کاهش می‌یابد. افزایش فشار باد، همچنین باعث افزایش مقادیر ویژه تایر و فرکانس‌های قطع، برای شکل مودهای ارتعاشی انتشاریافته می‌شود. کنت و همکارانش دریافتند که با افزایش فشار باد تایر، طیف ارتعاشات، به‌طورکلی دامنه بالاتر و انتقال فرکانس مثبت در رزونانس ساختاری را نشان می‌دهد، که این امر به دلیل سفت‌شدن ساختار تایر است [۱۰ و ۱۹].

پینای و همکارانش در شکل (۱۱) تأثیر هم‌زمان فشار باد تایر، سرعت رانندگی و سطح جاده‌های مختلف را بر طیف نويز حفره تایر؛ در شرایط بار روی تایر ۳۶۰۰ نیوتن و دمای حفره ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده‌اند [۸].

تأثیر فشار باد تایر بر نويز حفره تایر، به‌سرعت و زبری جاده بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، فشار باد هیچ تأثیری در رزونانس نويز حفره، در



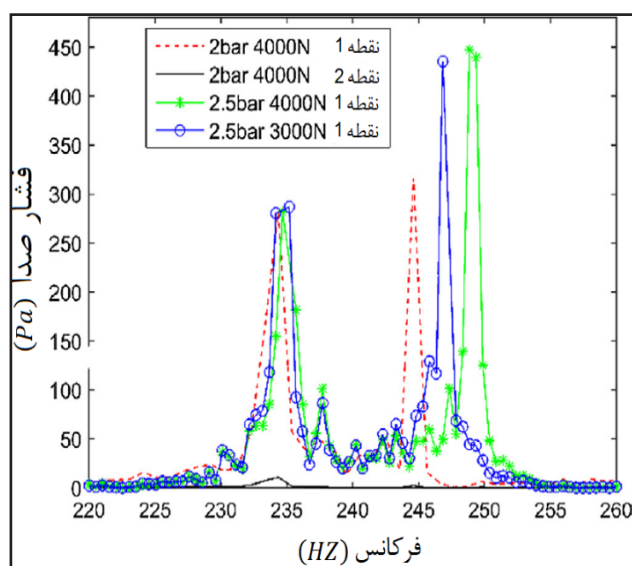
شکل ۱۱. تأثیر فشار باد تایر در سرعت‌ها و زبری‌های سطح متفاوت [۸]

مبسوط توضیح داده شده است.

در ادامه، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله مشخصات ساختاری و ابعادی تایر، ناهمواری جاده، سرعت حرکت خودرو، بارگذاری تایر، فشار باد تایر، دمای حفره تیر بر نویز حفره تیر مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که تأثیر تغییر تایر از تایر تابستانی به زمستانی، تقریباً ۳ دسی‌بل است، افزایش قطر تایر باعث کاهش فرکانس رزونانس و کاهش نویز حفره تیر می‌شود، افزایش ناهمواری جاده، سرعت حرکت خودرو و بارگذاری تایر، به‌طور کلی باعث افزایش نویز حفره تیر می‌شود، افزایش فشار باد تایر به نظر برخی از محققان باعث افزایش کم نویز حفره‌ی تایر شده و به اعتقاد هیو و همکارانش در فشار باد ۲/۲ بار بیشترین میزان نویز در حفره تایر به وجود می‌آید. با افزایش دمای حفره هوای تایر، فرکانس رزونانس کمی زیاد می‌شود؛ اما برای شدت صوت، رفتار هماهنگی وجود ندارد. همچنین این پارامترها بر روی میزان اثرگذاری پارامتر دیگر تأثیر می‌گذارند و می‌تواند باعث محسوس‌تر شدن یا مؤثر واقع‌نشدن تأثیر تغییر هر پارامتر به‌تنهایی شود، مثلاً افزایش فشار باد تایر باعث کاهش تأثیر ناهمواری جاده و افزایش سرعت حرکت خودرو باعث محسوس‌تر شدن تأثیر بقیه‌ی پارامترها می‌شود.

### سپاسگزاری IRM

پینای و همکارانش مشاهده کردند که به‌ازای افزایش هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد، فرکانس رزونانس حفره به‌طور متوسط به‌اندازه ۳ هرتز افزایش می‌یابد. زیرا افزایش دمای حفره، منجر به افزایش سرعت صوت و در نتیجه افزایش فرکانس رزونانس می‌شود؛ بنابراین به‌طور کلی با افزایش دما، فرکانس رزونانس کمی زیاد می‌شود؛ اما برای شدت صوت، رفتار هماهنگی وجود ندارد [۸].



شکل ۱۲. طیف دامنه فشار صدا در ۴ وضعیت متفاوت از نظر بارگذاری و فشار باد [۱۸] سطح متفاوت [۸]

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، بررسی روش‌های اندازه‌گیری، مدل‌سازی و عوامل مؤثر بر نویز و ارتعاشات حفره تایر انجام‌شده و در چندین بخش، به همه‌ی ابعاد آن به‌صورت دقیق پرداخته شده است. شناخت روش‌های اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات حفره تایر بسیار اهمیت دارد، زیرا برای بررسی هر پارامتر، نیاز به اندازه‌گیری آن وجود دارد. در بخش بعد روش‌های مدل‌سازی نویز و ارتعاش حفره تایر شامل مدل‌های نظری (ریاضی)، مدل‌های شبیه‌سازی‌شده و مدل‌های تجربی به‌منظور شناخت دقیق‌تر نویز و ارتعاشات حفره تایر، به‌طور

## مراجع

- [1] Li, T. (2018). Literature review of tire-pavement interaction noise and reduction approaches. *Journal of Vibroengineering*, 20(6), 2424-2452.
- [3] Li, T., Burdisso, R., & Sandu, C. (2018). Literature review of models on tire-pavement interaction noise. *Journal of Sound and Vibration*, 420, 357-445.
- [3] Mohamed, Z., & Wang, X. (2015). A study of tyre cavity resonance and noise reduction using inner trim. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50, 498-509.
- [4] Daniel, J. O. (2020). Automotive wheel and tyre design for suppression of acoustic cavity noise through the incorporation of passive resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 467, 115037.
- [5] Zhang, Y. B., Yao, Q., Xiao, L., Zhang, X. Z., Zheng, C. J., & Bi, C. X. (2019). On the Resonance of a Lined Tire Cavity. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(6), 1237-1242.
- [6] Kamiyama, Y. (2018). Development of twin-chamber on-wheel resonator for tire cavity noise. *International Journal of Automotive Technology*, 19(1), 37-43.
- [7] Li, T. (2018). A state-of-the-art review of measurement techniques on tire-pavement interaction noise. *Measurement*, 128, 325-351.
- [8] Pinay, J., Unrau, H. J., & Gauterin, F. (2018). Prediction of Close-Proximity Tire-Road Noise from Tire Cavity Noise measurements using a statistical approach. *Applied Acoustics*, 141, 293-300.
- [9] Masino, J., Luh, M., Frey, M., & Gauterin, F. (2017, March). Inertial sensor for an autonomous data acquisition of a novel automotive acoustic measurement system. In *2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)* (pp. 98-101). IEEE.
- [10] Hu, X., Liu, X., Wan, X., Shan, Y., & Yi, J. (2020). Experimental analysis of sound field in the tire cavity arising from the acoustic cavity resonance. *Applied Acoustics*, 161, 107172.
- [11] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293.
- [12] HORIKAWA, S., TANAKA, Y., NAKAMURA, M., & MURATA, S. (2016). Theoretical Analysis of Sound Pressure Distributions inside a Tire Cavity. *Advanced Experimental Mechanics*, 1, 149-154.
- [13] Molisani, L. R., Burdisso, R. A., & Tsihlias, D. (2003). A coupled tire structure/acoustic cavity model. *International journal of solids and structures*, 40(19), 5125-5138.
- [14] Cao, R., & Bolton, J. S. (2015). Improved model for coupled structural-acoustic modes of tires. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 8(2015-01-2199), 845-854.
- [15] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force Transmission Characteristics for a Loaded Structural-Acoustic Tire Model. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 11(06-11-04-0025), 305-319.
- [16] Wang, Z., Yi, J., Liu, Y., & Liu, X. (2019, September). Characteristics of sound pressure in the tire cavity arising from acoustic cavity resonance excited by the curvature change of tread. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 259, No. 2, pp. 7371-7379). Institute of Noise Control Engineering.

- [17] Liu, Y., Liu, X., Yuan, J., Yi, J., Hu, X., & Shan, Y. (2019, September). Research on the Model of Load Acting on the Rim Arising from Tire Acoustic Cavity Resonance. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 259, No. 8, pp. 1531-1540). Institute of Noise Control Engineering.
- [18] Yi, J., Liu, X., Shan, Y., & Dong, H. (2019). Characteristics of sound pressure in the tire cavity arising from acoustic cavity resonance excited by road roughness. *Applied Acoustics*, 146, 218-226.
- [19] Li, T. (2018). Influencing Parameters on Tire-Pavement Interaction Noise: Review, Experiments, and Design Considerations. *Designs*, 2(4), 38.
- [20] Mohamed, Z., & Wang, X. (2015). A study of tyre cavity resonance and noise reduction using inner trim. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50, 498-509.
- [21] Gallrein, A., Baecker, M., & Guan, J. (2018). Simulation of Dynamic Gas Cavity Effects of a Tire under Operational Conditions (No. 2018-01-0682). SAE Technical Paper.
- [22] Tanaka, Y., & Murata, S. (2016, August). Influence of Tire Deformation on Sound Pressure Level inside a Tire. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 253, No. 5, pp. 3542-3547). Institute of Noise Control Engineering.

***IRM***