



## بررسی روش های آزمایشگاهی و اجرایی اندازه گیری انرژی ناشی از آلودگی صوتی ترافیک

درنا سادات شیخ الاسلامی، رشید تن زاده\*، فریدون مقدس نژاد

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

### کلمات کلیدی:

نویز  
آزمایشگاهی  
اجرایی  
نقشه صوتی  
کاهش آلودگی

**خلاصه:** اندازه گیری و سنجش میزان آلودگی صوتی ترافیکی، همواره مورد توجه مدیران سیستم حمل و نقل شهری بوده است. تعاریف صوت و نویز، بررسی تفاوت های آن ها، عوامل تولید و انتشار آلودگی صوتی ترافیکی، روش های مختلف آزمایشگاهی و اجرایی در راستای اندازه گیری انرژی صوتی، نقشه های صوتی و بررسی روش های کاهش انرژی صوتی از مهم ترین عناوین مورد بررسی در این تحقیق است. اندرکنش لاستیک و روسازی به عنوان مهم ترین عامل آلودگی صوتی ترافیکی در سرعت های بالای ۴۰ کیلومتر بر ساعت برای ماشین های سواری و در سرعت های بالای ۷۰ کیلومتر بر ساعت برای کامیون ها، منبع اصلی آلودگی صوتی شناخته شده است. استفاده از درصد فضای خالی مناسب در رویه های آسفالتی، آلودگی صوتی حاصل از اندرکنش لاستیک و روسازی را تا ۱۰ دسی بل کاهش داده است. آسفالت متخلخل با فضای خالی بیش از ۲۰٪ عملکرد مطلوبی را در کاهش آلودگی صوتی ترافیکی نشان داده است. شدت آلودگی صوتی ترافیکی با استفاده از روش های آزمایشگاهی و اجرایی مورد اندازه گیری قرار گرفته است. روش های آزمایشگاهی در محیط آزمایشگاه و با شرایط کنترل شده قابل انجام است. نتایج آزمایش ها دقیق تر بوده و به طور گسترده در اندازه گیری آلودگی صوتی حاصل از اندرکنش بین لاستیک و سطح روسازی مورد استفاده قرار گرفته است. روش های اجرایی با وجود تحت تاثیر قرار گرفتن آلودگی های صوتی محیط، نویز واقعی اندرکنش لاستیک با روسازی را به طور واقعی تری اندازه گیری می کند.

### ۱- مقدمه

یکی از مهم ترین مشکلات در حال گسترش در بسیاری از کشورهای دنیا، آلودگی صوتی ترافیکی است. استفاده کنندگان از راه، همواره در معرض خطراتی از جمله بیماری های جسمی و روانی ناشی از آلودگی های صوتی قرار دارند [۱ و ۲]. آلودگی صوتی وسایل نقلیه در دو حالت داخلی (موتور، سیستم مکش، آگزوز) و خارجی (فرآیند پیش رانش، مقاومت آیرودینامیکی، اندرکنش لاستیک و سطح رویه روسازی) ایجاد شده است [۳]. نوع و ساختار رویه روسازی، جنس لاستیک، سرعت، ساختار آیرودینامیکی، اندرکنش میان لاستیک و روسازی، سیستم رانش، فن و آگزوز وسایل نقلیه در میزان آلودگی صوتی ترافیکی موثر بوده و تغییرات این پارامترها در شدت آلودگی صوتی تاثیرگذار است. اندرکنش لاستیک و سطح رویه روسازی (به علت نیروی اصطکاک میان لاستیک و سطح جاده)، به عنوان یکی از مهم ترین عوامل تولید آلودگی صوتی ترافیکی شناخته شده است [۴]. سرعت وسایل نقلیه در میزان انتشار آلودگی صوتی ترافیکی موثر است به طوری که در خودروی

سواری با سرعت بالای ۴۰ کیلومتر بر ساعت و کامیون ها با سرعت بالای ۷۰ کیلومتر بر ساعت، آلودگی صوتی ناشی از اندرکنش لاستیک با سطح روسازی بحرانی تر است [۵].

شدت آلودگی صوتی ترافیکی با استفاده از روش های آزمایشگاهی و اجرایی قابل اندازه گیری است. این روش ها عبارتند از روش های آزمایشگاهی لوله آمپدانس [۶] سقوط لاستیک [۷] و استوانه آزمایشگاهی [۸] و روش های اجرایی عبور آماری [۹ و ۱۰]، اندازه گیری نزدیک [۱۰ و ۱۱] و تراکم صوت در تخته. روش های آزمایشگاهی در محیط آزمایشگاه و با شرایط کنترل شده قابل انجام است. نتایج آزمایش ها دقیق تر بوده و به طور گسترده در اندازه گیری آلودگی صوتی حاصل از اندرکنش بین لاستیک و سطح روسازی مورد استفاده قرار گرفته است. روش لوله آمپدانس یکی از روش های آزمایشگاهی است که تنها قابلیت اندازه گیری ضریب جذب صدای مواد با امواج دارای زاویه عمودی را داشته است. روش سقوط لاستیک در مقایسه با روش لوله آمپدانس، قابلیت سنجش میزان صدا برای امواج با زوایای مختلف را دارد. همچنین میتوان عملکرد میرایی ارتعاش

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: rashidtanazadeh@aut.ac.ir



روش های کاهش آلودگی صوتی ترافیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقایسه و انتخاب کارآمدترین روش اندازه گیری سطح نویز ترافیکی با استفاده از مدل تاپسیس انجام شده است.

## ۲- صوت، نویز و تفاوت آنها

### ۲-۱- تعریف صوت

صوت، ارتعاشی است که به صورت یک موج صوتی ناشی از تغییرات کوچک و سریع فشار در یک محیط سیال ایجاد شده است [۱۷]. همچنین میتوان گفت صوت، انرژی است که از تحرک ذرات ماده ایجاد شده است [۱۸]. علت انتشار صوت، برخورد ذرات با هم و حرکت ذرات است. انتشار صوت تحت تاثیر سه عامل قرار دارد: الف) رابطه میان چگالی و فشار محیط انتشار، ب) حرکت محیط انتشار که با توجه به جهت حرکت میتواند باعث افزایش یا کاهش سرعت موج صوتی گردد، ج) ویسکوزیته محیط انتشار [۱۹].

### ۲-۲- تعریف نویز

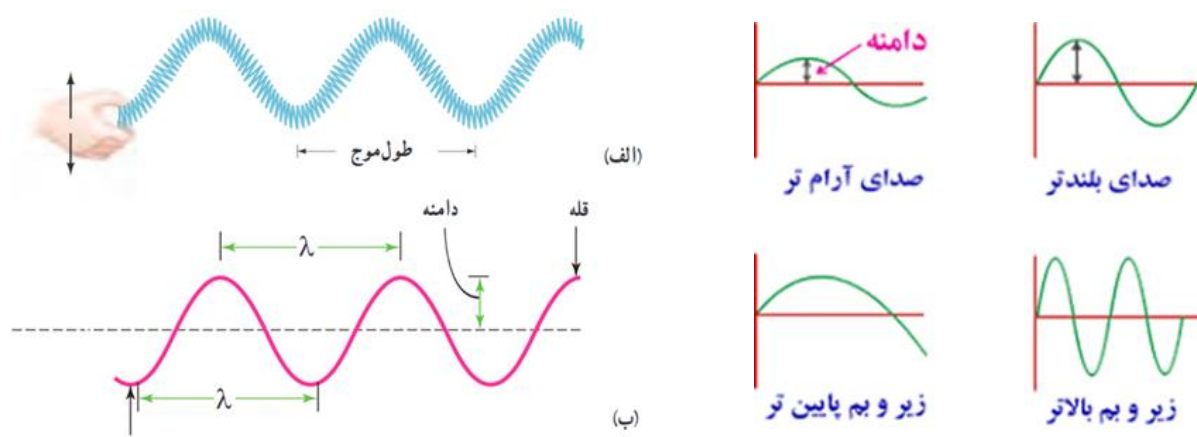
در تعاریف مهندسی، نویز، سیگنال ناخواسته ای است که بر سیگنال های دیگر، تاثیر نامطلوب داشته و در ایجاد آلودگی صوتی موثر است. نویز به عنوان صوت ناخواسته، ارتعاشی است که از طریق محیط سیال همچون آب یا هوا منتشر شده است [۱۷ و ۲۰]. مثلاً صوت منتشر شده از اندرکنش لاستیک و روسازی به علت نامطلوب بودن، نویز نامیده شده است. عوامل موثر در شدت میزان نویز عبارت است از: الف) عوامل مرتبط با مشخصات فیزیکی صوت مانند سطح، مدت زمان و طیف فرکانس صوت، ب) عوامل انسانی مانند ویژگی های فیزیولوژیکی، روانی و اجتماعی افراد (موثر در درک ذهنی در تشخیص نویز) [۲۱]. روش استاندارد برای ارزیابی نویز، اندازه گیری انرژی یا توان امواج صوتی در یک بازه زمانی مشخص است [۲۲]. با توجه به نتایج تحقیقات سازمان جهانی بهداشت در راستای دستیابی به یک خواب شبانه راحت، سطح نویز نباید از ۳۰ دسیبل تجاوز نماید و همچنین برای مختل نشدن آرامش افراد باید از ایجاد نویز بیشتر از ۴۵ دسیبل اجتناب شود [۲۳].

### ۲-۳- بررسی تفاوت های صوت و نویز

نویز، صوت ناخواسته ای است که میتواند برای انسان ناراحت کننده باشد. نویز برای سلامتی همه موجودات خطرناک است. دو مشخصه مهم

مصالح روسازی را در این روش مورد اندازه گیری قرار داد. در روش استوانه آزمایشگاهی، صدای منتشر شده از لاستیک، مکانیزم صدای اندرکنش روسازی با لاستیک و تاثیر عوامل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحقیقات لینگ و همکاران نشان داده است که در روش های اندازه گیری آزمایشگاهی میتوان تاثیر پارامترهای محیطی مانند دما، سرعت باد و سر و صدای محیط را به میزان قابل توجهی کاهش داد که این موضوع منجر به دقت بالای این روش ها شده است [۱۳]. اما در برخی از موارد، شرایط محیطی آزمایشگاه با شرایط محیطی جاده یکسان نبوده و شرایط واقعی جاده به طور کامل شبیه سازی نشده است. در نتیجه ممکن است نتایج روش های آزمایشگاهی در تجزیه و تحلیل داده های آلودگی صوتی گمراه کننده باشند. یکی از روش های اجرایی سنجش آلودگی صوتی، روش عبور آماری است که تجهیزات کمتری لازم داشته [۱۴] و مهم ترین ناکارایی آن، تحت تاثیر شرایط محیطی قرار داشتن است [۱۳]. با نزدیک شدن وسایل نقلیه، دامنه صدای ضبط شده، افزایش و با دور شدن وسایل نقلیه، این دامنه کاهش یافته است که در نتیجه دامنه طیفی محاسبه شده در یک دوره زمانی مشخص، قابل اعتماد نیست [۱۴]. روش اندازه گیری نزدیک به عنوان یکی از روش های اجرایی متعارف شناخته شده است که یکی از مزایای آن تشخیص خرابی های روسازی است [۱۵]. همچنین در این روش با اندازه گیری صوت در فواصل ۵ تا ۱۰ متر میتوان بخش وسیعی از جاده را مورد ارزیابی قرار داد و به مقدار میانگین صوت قابل اعتمادتری رسید [۱۶]. روش تراکم صوت در تخته مشابه با روش اندازه گیری نزدیک است که در این روش از میکروفن های پروب دوگانه برای اندازه گیری سطح شدت صوت استفاده می گردد [۱۳ و ۱۴]. با اینکه روش های عبوری، جزئیات بیشتری را ارائه می دهند، نسبت به روش های اندازه گیری نزدیک و تراکم صوت در تخته طولانی تر بوده و روش مناسب باید با توجه به نیاز پروژه انتخاب گردد [۱۶].

در این تحقیق، روش های آزمایشگاهی و اجرایی اندازه گیری انرژی ناشی از آلودگی صوتی ترافیک جاده ای مورد بررسی قرار گرفت. با مطالعه بیش از ۴۱۵ مقاله مرتبط و جداسازی عناوین و چکیده های مشابه، ۳۵۰ مقاله معتبر به طور جامع تری بررسی شد. در انتها با بررسی دقیق ساختار و جزئیات ۱۶۰ مقاله تخصصی، بخش های مختلف این تحقیق به صورت زیر بیان شده است: در بخش اول به تعریف صوت و نویز و تفاوت های آن پرداخته شد. در بخش های بعدی، عوامل تولید و انتشار آلودگی صوتی ترافیکی و روش های سنجش آزمایشگاهی و اجرایی انرژی صوت از سطح راه بررسی شد. نحوه استخراج و ارزیابی نقشه صوتی نواحی مختلف شهری و



شکل ۱. مشخصه های طول موج، دامنه و تغییرات مقادیر دامنه ی صوت

Fig. 1. Wavelength, amplitude and variations in sound amplitude values

### ۳- عوامل تولید و انتشار آلودگی صوتی ترافیکی

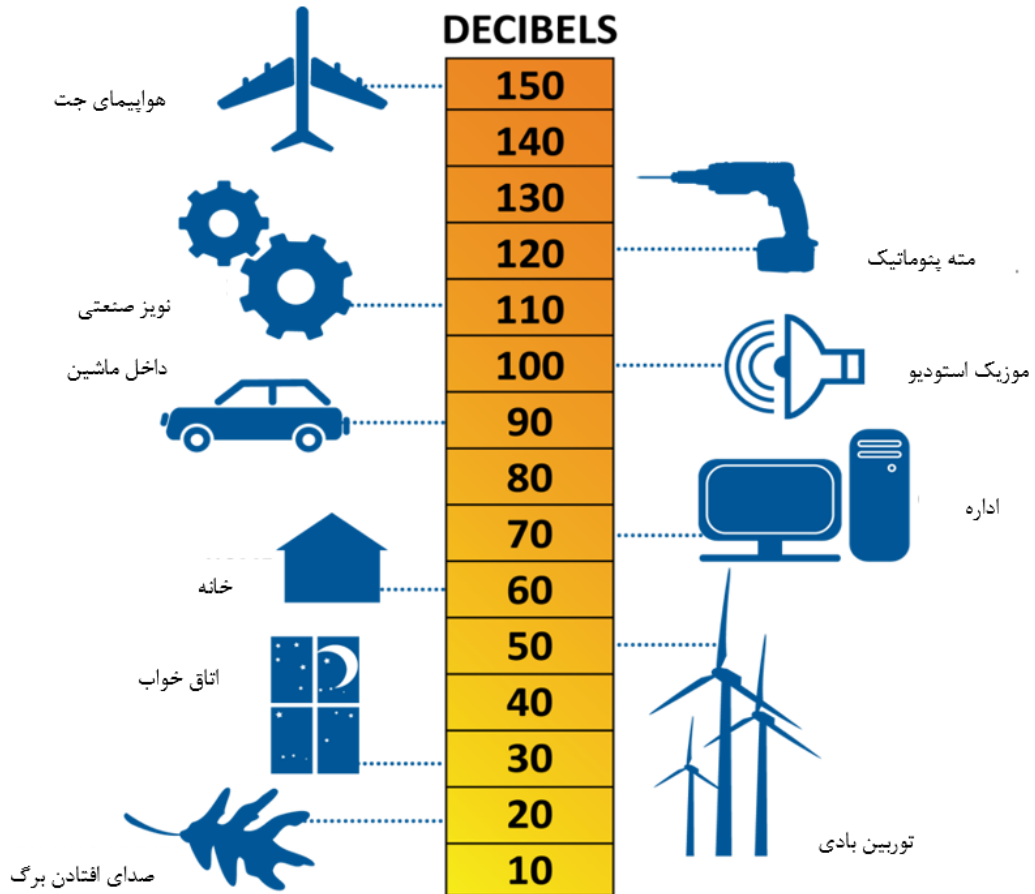
منابع اصلی آلودگی صوتی ترافیکی عبارت است از منابع داخلی (موتور، سیستم مکش و اگزوز خودرو) و منابع خارجی (فرآیند پیش رانش، مقاومت آیرودینامیکی و اندرکنش لاستیک و سطح رویه روسازی) [۱۷ و ۲۴ و ۲۵]. تغییرات این منابع تولیدکننده آلودگی صوتی در سرعت‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۶]. در سرعت‌های کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت، فرآیند پیش رانش، در سرعت‌های بالای ۴۰ کیلومتر بر ساعت، اندرکنش لاستیک روسازی و در سرعت‌های بسیار بالا، شکل آیرودینامیکی ماشین‌های سواری به عنوان منابع اصلی تولیدکننده آلودگی ترافیکی شناخته شده است [۲۷ و ۲۰]. نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با سطح روسازی به دو دسته ی پمپاژ هوا و ارتعاش قابل تقسیم است. ارتعاش از سه مکانیزم ضربه ی آج، چسبندگی-لغزشی و چسبندگی-ضربه، تشکیل شده است [۲۸، ۲۹]. پمپاژ هوا به دلیل فشرده شدن هوا در شیارهای لاستیک ایجاد می‌شود. در سطح تماس لاستیک و روسازی، شیارهای لاستیک تحت فشار قرار گرفته و هوای وارد شده به این شیارها نیز فشرده می‌شود و به داخل و خارج از آن‌ها پمپ می‌شوند. بنابراین در اثر فشار و پمپاژ هوا، صوت تولید می‌شود. مکانیزم ضربه ی آج در اثر چرخش لاستیک و برخورد بلوک‌های آج لاستیک با روسازی ایجاد شده است. با برخورد آج لاستیک به روسازی، ارتعاش ایجاد شده در چارچوب لاستیک، تبدیل به صوت شده است.

در ارزیابی صوت و نویز، دامنه و فرکانس آن است. بلندی یا شدت صوت بر حسب دسی بل بیان می‌شود.

دسی بل یک واحد بدون بعد است که با استفاده از نسبت مقدار اندازه گیری شده به مقدار مرجع محاسبه می‌شود. دسی بل بر حسب رابطه ی (۱) تعیین می‌شود.

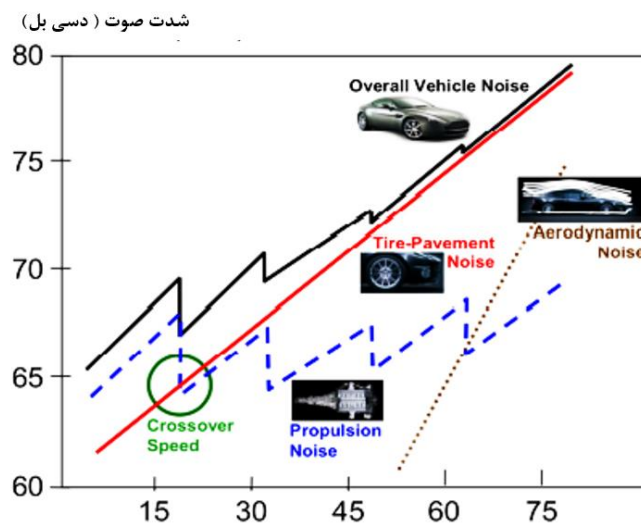
$$dB = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1)$$

در این رابطه  $P_1$  توان خروجی و  $P_2$  توان ورودی است. اگر توان ورودی بیش از توان خروجی باشد، پاسخ به صورت dB- بیان می‌شود که به معنای تضعیف شدت صوت است. اگر توان خروجی بزرگتر از توان ورودی باشد، پاسخ به صورت dB+ بیان می‌شود که به معنای تقویت شدت صوت است. همچنین فرکانس صوت با استفاده از طول موج تعیین می‌شود. بنابراین فرکانس صوت بر حسب طول موج در ثانیه یا سیکل در ثانیه و به طور معمول هرترز بیان می‌شود. انسان‌ها قادر به دریافت و درک سطوح صوتی بین ۲۰ هرترز تا ۲۰۰۰۰ هرترز می‌باشند و حداکثر حساسیت شنوایی انسان بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرترز است. در شکل ۱ مشخصه های طول موج، دامنه و نیز تغییرات مقادیر دامنه صوت قابل مشاهده است. همچنین محدوده شنوایی انسان در شکل ۲ مشخص شده است.



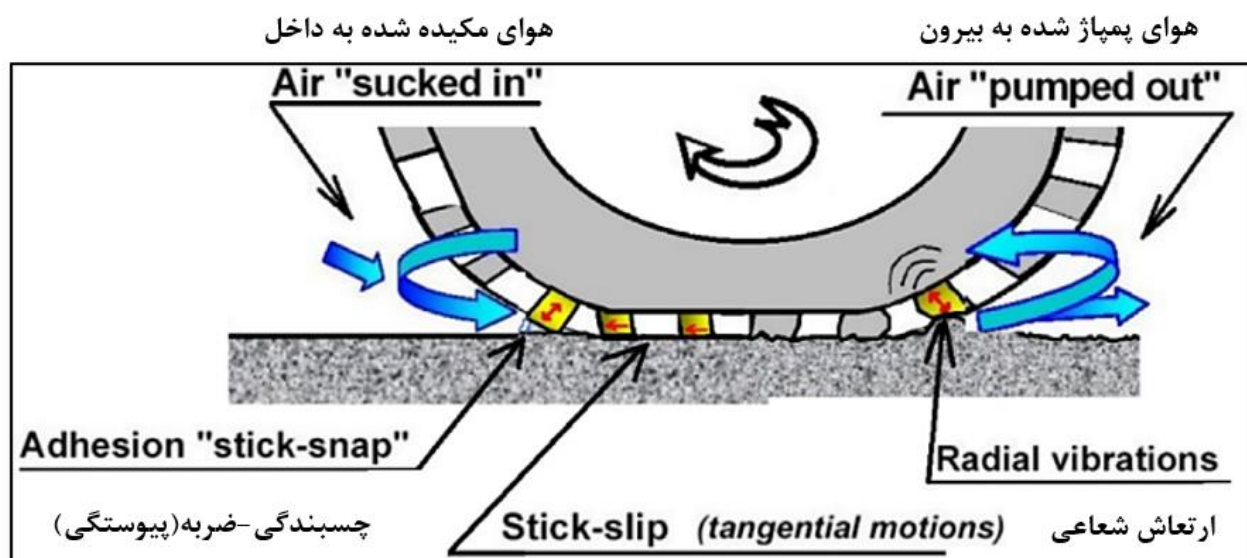
شکل ۲. محدوده شنوایی انسان با توجه به صداهای اطراف ما

Fig. 2. Human hearing range according to various sounds around us



شکل ۳. منابع نویز ترافیکی در مقابل سرعت [۳۰]

Fig. 3. Traffic noise resources for different speeds [30]



چسبندگی-لغزشی (حرکات مماسی)

شکل ۴. مکانیزم های تولید نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی [۲۸]

Fig. 4. Mechanisms of tire-pavement interaction noise (TPIN) generation [28]

### ۳-۱- مشخصات سطح روسازی

مشخصات سطح انواع روسازی ها عبارت است از: بافت سطحی، درصد فضای خالی، مشخصات سنگدانه ها، اصطکاک، عمر، سختی و ویژگی مصالح روسازی. روسازی ها در حالت کلی به دو نوع روسازی آسفالتی و روسازی بتنی قابل تقسیم است. عملکرد صوتی انواع مختلف روسازی ها متفاوت است [۳۱]. بنرت و همکاران [۳۲] با انجام آزمایش بر روی ۴۲ قطعه از روسازی های مختلف در راستای ارزیابی تاثیر نوع سطح روسازی بر نویز ایجاد شده از اندرکنش بین لاستیک با روسازی دریافتند که روسازی های آسفالتی کمترین مقدار نویز را تولید می کنند. همچنین نتایج آزمایش ها نشان داد که میانگین سطح نویز اندرکنش لاستیک با روسازی در ۳۰ نمونه از روسازی های آسفالتی حدود ۹۸/۵ دسی بل و برای ۱۲ نمونه از سطوح روسازی های بتنی در حدود ۱۰۲/۶ دسی بل بوده است.

سیامکومار و همکاران [۳۳] دریافتند که سطوح نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در روسازی های بتنی، ۲ دسیبل بیشتر از روسازی های آسفالتی است. این تفاوت به علت ساختار سخت تر و فشرده تر روسازی بتنی نسبت به روسازی آسفالتی است. در نتیجه، لرزش و پمپاژ هوا بین

در مکانیزم چسبندگی-لغزشی، بلوک های آج لاستیک در هنگام شتاب یا ترمز، نیروهای کششی را از لاستیک به روسازی منتقل می کنند. همچنین به دلیل اعوجاج چارچوب لاستیک در سطح تماس با روسازی، نیروهای افقی قابل توجهی به بلوک های آج و سطح تماس وارد می شود. در صورتی که این نیروهای افقی از نیروی اصطکاک تجاوز نماید، بلوک های آج برای مدت کوتاهی به لرزش افتاده و سپس به روسازی متصل می گردند. عمل لغزش و چسبیدن باعث ایجاد ارتعاش و صوت شده است. مکانیزم چسبندگی-ضربه یا پیوستگی، از پیوستگی میان بلوک های آج لاستیک و روسازی ایجاد شده است. هرگاه بلوک های آج لاستیک از سطح تماس جدا گردد، نیروهای پیوستگی موجب نگه داشتن این بلوک ها شده و پس از آزاد شدن آنها، انرژی صوتی و ارتعاش در چارچوب لاستیک ایجاد شده است [۲۸]. این فرآیندها در شکل ۴ نشان داده شده است. نویز حاصل از اندرکنش لاستیک و روسازی به عنوان مهم ترین منبع آلودگی صوتی ناشی از ترافیک، تحت تاثیر پارامترهای زیادی از جمله مشخصات سطح روسازی، مشخصات لاستیک، عوامل محیطی و پارامترهای قابل کنترل توسط راننده قرار دارد [۲۵ و ۳].

لاستیک‌ها و سطح روسازی تشدید یافته و نویز حاصل از اندکنش لاستیک باروسازی افزایش یافته است [۳۴ و ۳۵].

یکی از پارامترهایی که بالاترین تاثیر را بر میزان نویز تولید شده از اندرکنش روسازی با لاستیک دارد، بافت سطح روسازی است [۳۶]. تغییر بافت سطح روسازی، تاثیر متفاوتی بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی و همچنین مقاومت در برابر لغزش دارد [۳۷]. مطابق شکل ۵، بافت سطح روسازی بسته به طول و دامنه صوت به چهار دسته ی ریز بافت، درشت بافت، مگاتکسچر و ناهمواری تقسیم شده است [۳۸]. در این راستا، ریز بافت به چسبندگی سطحی مرتبط بوده و منجر به حفظ ضریب چسبندگی بین لاستیک و سطح روسازی شده است. همچنین درشت بافت تاثیر مهمی در کاهش نویز تولید شده از اندرکنش بین لاستیک با روسازی، حفظ مقاومت در برابر لغزش و همچنین ارتقاء کیفیت رانندگی داشته است [۳۹].

با توجه به ارتباط مستقیم ریز بافت و اصطکاک، ریز بافت بر نویز ناشی از ارتعاش لاستیک که در اثر اصطکاک بین لاستیک و سطح روسازی ایجاد شده در فرکانس های بالای ۱۰۰۰ هرتز تاثیرگذار است. افزایش ریز بافت باعث افزایش اصطکاک و مکانیزم چسبندگی-لغزشی و به تبع آن افزایش مکانیزم تولید نویز شده است. از طرفی افزایش ریز بافت باعث کاهش پیوستگی و در نتیجه کاهش نویز تولیدی شده است. این تغییرات متناقض، نشان دهنده عدم وجود رابطه مستقیم میان ریز بافت و نویز ایجاد شده است [۳۶ و ۴۰]. لوکیونیا و همکاران [۴۱] دریافته اند که ریز بافت بیشتر به چسبندگی مرتبط بوده و موجب حفظ ضریب چسبندگی بین لاستیک و سطح روسازی شده است. درشت بافت نیز فاکتور مهمی است که بر پمپاژ هوا، ارتعاشات ناشی از اصطکاک، چسبندگی و تشدید صوت (رزونانس) تأثیر گذار است [۳۶]. در میان انواع بافت روسازی با طول موج‌های مختلف، درشت بافت، بیشترین تاثیر را بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی دارد [۴۰]. همچنین پولوی و همکاران [۳۹] دریافته اند که درشت بافت، نقش مهمی در کاهش نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، حفظ مقاومت در برابر لغزش و همچنین ارتقاء کیفیت رانندگی داشته است.

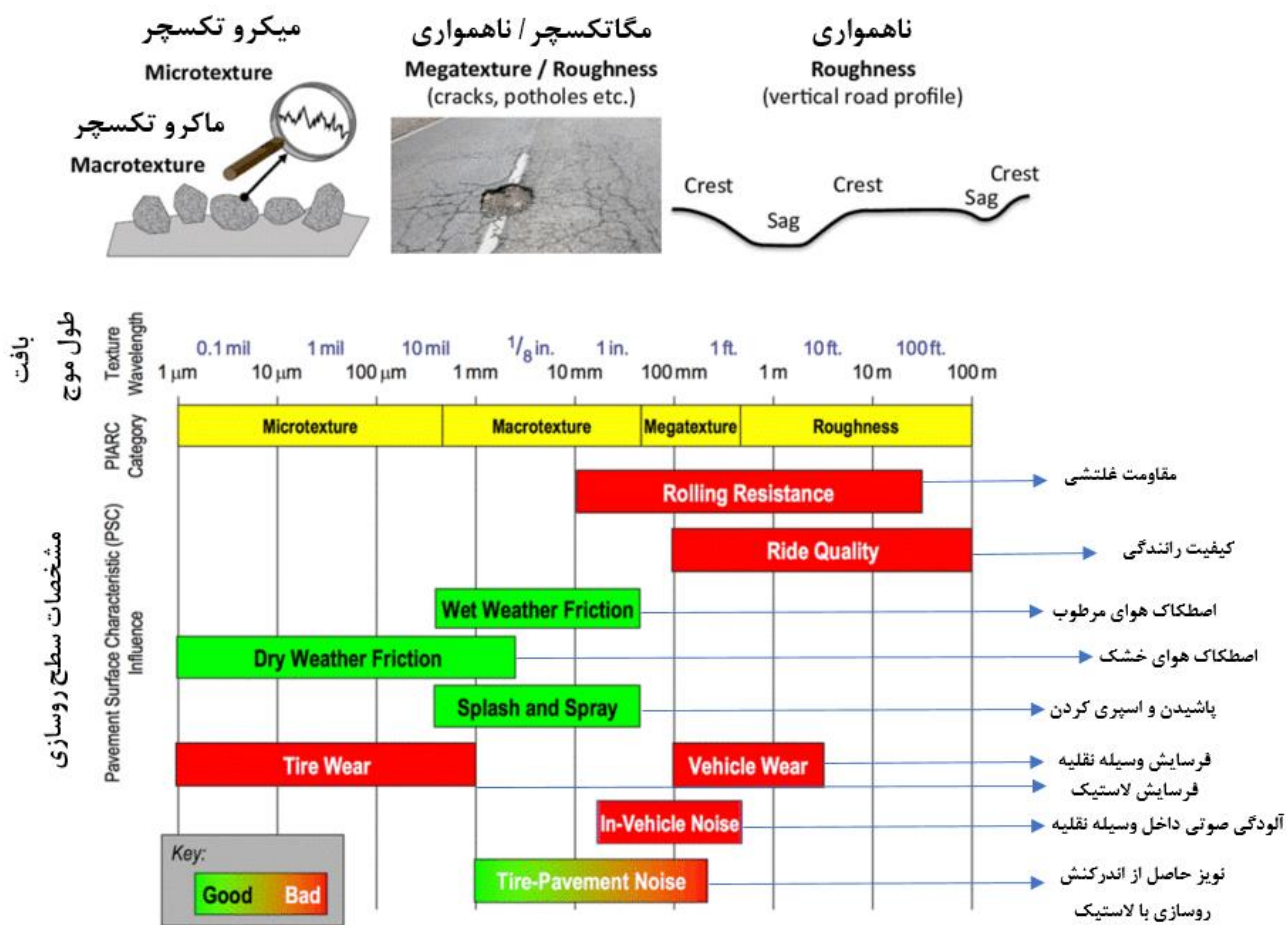
نتایج تحقیقات نشان داده است که در فرکانس‌های پایین (پایین تر از ۱۰۰۰ هرتز) و محدوده طول موج بافت ۱۰ الی ۵۰ میلی متر، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، با افزایش درشت بافت افزایش یافته است. در فرکانس های بالا و محدوده طول موج بافت ۰/۵ الی ۱۰ میلی متر، با

افزایش درشت بافت، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، کاهش یافته است [۴۰ و ۴۲].

سختی فر و همکاران [۴۳] نشان دادند که روسازی های با سطوح صاف تر، میزان نویز کمتری را در فرکانس های پایین (پایین تر از ۱۰۰۰ هرتز) تولید و در فرکانس های بالا (بالا تر از ۱۶۰۰ هرتز)، نویز بیشتری را در مقایسه با سطوح درشت تر تولید می کنند. مطابق نتایج، درشت بافت، میزان نویز ایجاد شده در فرکانس پایین را افزایش داده است. آنفوسو لده و همکاران [۴۴] با تحقیق بر روی رابطه ی میان بافت سطح روسازی و سطوح نویز تولید شده دریافته اند که میزان نویز در فرکانس های زیر ۱۵۰۰ هرتز با افزایش سطوح بافت، افزایش یافته است. این افزایش سطوح بافت، منجر به کاهش سطوح نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در فرکانس های بالای ۱۵۰۰ هرتز شده است. مگاتکسچر و ناهمواری نیز باعث ارتعاش نامنظم لاستیک های خودرو شده است [۳۷]. به طور کلی مگاتکسچر تاثیر ناچیزی بر نویز حاصل از اندکنش لاستیک با روسازی داشته است [۴۵ و ۴۰]. مطابق نتایج، ناهمواری سطحی، تاثیر چندانی بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی نداشته است [۴۰].

تخلخل بالای روسازی، سطح نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را تا حد زیادی کاهش داده است. آسفالت متخلخل با تخلخل بیش از ۲۰٪، کمترین آلودگی صوتی را به همراه داشته است. علاوه بر این، تخلخل روسازی تقریباً تمام مکانیزم های تولید و تقویت نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را کاهش داده است، زیرا انرژی فشار صوتی از طریق اصطکاک سیال در این کانال های ماریچ، جذب و پخش شده است. از طرفی تخلخل یا فضای خالی روسازی، به نوع مخلوط مانند اندازه سنگدانه ها مرتبط بوده و هرچه سنگدانه ها درشت تر باشند، ابعاد منافذ و تخلخل مخلوط بیشتر است [۴۰].

دونوان [۴۶] دریافته که استفاده از روسازی آسفالتی با دانه بندی باز<sup>۱</sup> در یکی از آزادراه های کشور آمریکا موجب کاهش نویز ترافیکی تا حدود ۱۰ دسیبل شده است. افزایش سن و پیرشدگی روسازی بر بافت روسازی تاثیرگذار است و موجب تغییر در ریز بافت و درشت بافت شده است [۴۷]. به طور کلی با افزایش پیرشدگی روسازی و تغییر بافت و اصطکاک روسازی، میزان نویز حاصل از اندکنش لاستیک با روسازی افزایش یافته است [۴۸].



شکل ۵. مقادیر طول موج برای انواع بافت سطح روسازی [۳۷]

Fig. 5. Wavelength values for different types of pavement surface textures [37]

است. همچنین عرض بیشتر لاستیک موجب جابجایی بیشتر هوا در سطح مشترک لاستیک و روسازی و تقویت پمپاژ هوا شده است. در نتیجه لاستیک های عریض تر، خصوصا در فرکانس های کمتر، نویز بیشتری به وجود آورده است [۴۰ و ۵۰].

به طور کلی سختی لاستیک با نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، به خصوص در فرکانس های بالا و سطوح ناهموار ارتباط مستقیم نشان داده است [۵۱]. روچوکس و بیس [۵۲] دریافتند که لاستیک های نرم در فرکانس های بالا عملکرد نویز بهتری دارند. افزایش عمر و ساییدگی لاستیک نیز جزء عوامل تاثیرگذار بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی است. پیرشدگی لاستیک منجر به افزایش سختی و ایجاد ترک در لاستیک شده است که بر ویژگی های ارتعاشی آن تاثیرگذار است. علاوه بر این منجر به نازک شدن و کمتر شدن عمق آج نیز شده است. به طور کلی

### ۳-۲- مشخصات لاستیک وسایل نقلیه

مشخصات لاستیک وسیله نقلیه همچون نوع، ابعاد، تعداد، سختی، عمر، میزان ساییدگی، بار و فشار لاستیک نیز بر اندرکنش میان لاستیک و روسازی به عنوان یک منبع نویز شناخته شده است. موسسه تحقیقات راه و ترابری سوئد [۴۹] با تحقیق در مورد انواع لاستیک ها دریافتند که مقدار نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، در لاستیک های زمستانی و تابستانی مشابه است. سندبرگ و همکاران [۲۸] دریافتند که در شرایط مشابه در طراحی آج ها و سرعت چرخش، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در لاستیک شعاعی، حدود ۲ دسیبل کمتر از لاستیک بایاس است. امروزه عرض لاستیک ها افزایش یافته که ممکن است از نظر کاهش نویز، عملکرد مناسبی نداشته باشند. به این صورت که با افزایش عرض لاستیک، تاثیر بافت و آج لاستیک بیشتر شده و منجر به ارتعاش بیشتر شده

### ۳-۴- پارامترهای قابل کنترل توسط راننده

پارامترهای قابل کنترل توسط راننده شامل فاکتورهایی مانند سرعت رانندگی، بار و فشار لاستیک، نیروهای مماسی و شتاب وسیله نقلیه است. سرعت وسایل نقلیه یکی از تاثیرگذارترین پارامترها بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی است و به همین علت در اکثر مدل های نویز اندرکنش لاستیک با روسازی در نظر گرفته شده است [۶۲]. رابطه تقریبی میان سرعت و نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، بصورت رابطه ۲ بیان شده است [۶۳].

$$L_p = 10n \log_{10}(v) + b \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $L_p$  سطح فشار صوت،  $n$  توان سرعت،  $v$  سرعت وسیله نقلیه و  $b$  ضریب سرعت می باشد. نتیجه تحقیقات لی [۴۰] نشان داد که با افزایش سرعت، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، افزایش یافته است. بار لاستیک نیز یکی از فاکتورهای قابل کنترل توسط راننده است که بر مکانیزم های متعدد تولید نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی تاثیر گذار است. تاریمان [۶۴] بیان داشت که با افزایش بار لاستیک های شعاعی در ماشین های سواری، تا ۲ برابر و با تنظیم فشار باد لاستیک، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، به میزان ۱ تا ۲ دسیبل افزایش یافته است. تانگ و همکاران [۶۵] نیز دریافتند که این نویز با افزایش بار عمودی لاستیک افزایش یافته است. پارامترهای تاثیرگذار بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک و روسازی و نحوه ی ارتباط آن ها در جدول ۱، نشان داده شده است.

### ۴- روش های آزمایشگاهی و اجرایی اندازه گیری سطوح نویز ترافیکی

در راستای تعیین روش های کاهش آلودگی صوتی ترافیکی، شناخت روش های قابل اعتماد اندازه گیری سطوح نویز با اهمیت است [۱۷]. در این بخش روش های اندازه گیری نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را می توان به دو دسته روش های آزمایشگاهی و اجرایی تقسیم کرد.

نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، با افزایش ساییدگی لاستیک افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. حداکثر نویز تولید شده در حالتی که نیمی از عمر لاستیک سپری شده باشد، ایجاد شده است [۵۳-۵۵]. همچنین لیژر و همکاران [۵۶] دریافتند که در ابتدا نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، افزایش یافته و سپس با افزایش ساییدگی به دلیل صاف شدن انحنا ی اولیه لاستیک و لبه ها و سپس کاهش عمق آج، کاهش یافته است.

### ۳-۳- عوامل محیطی

پارامترهای محیطی یا جوی شامل دما، رطوبت، باد، گرد و غبار و آب موجود در سطح به علت تاثیرگذاری بر خواص اندرکنش لاستیک با روسازی در بسیاری از مدل های نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در نظر گرفته شده است. دما به عنوان یکی از عوامل محیطی، متشکل از دمای روسازی، دمای لاستیک و دمای هوا است [۴۰]. دمای روسازی به صورت مستقیم با دمای هوا مرتبط بوده است [۵۷]. دمای لاستیک نیز از طریق اندرکنش تحت تاثیر دمای روسازی قرار گرفته است [۵۸]. سندبرگ و اسمنت [۲۸] دریافتند که دمای لاستیک نسبت به دمای روسازی یا دمای هوا با نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، همبستگی کمتری دارد. بنابراین دمای لاستیک به عنوان پارامتری تاثیرگذار نمی باشد و به ندرت در مدل های نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در نظر گرفته شده است. کونیشی و همکاران [۵۹] و آنفوسو و پیچاد [۶۰] به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای هوا، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، حدود ۰٫۴ تا ۰٫۱ دسی بل در هر درجه سانتیگراد، کاهش یافته است.

رطوبت هوا بر رطوبت روسازی و به تبع آن، نویز حاصل از اندرکنش روسازی با لاستیک تاثیرگذار است. مکدنیل و همکاران [۶۱] بارندگی و رطوبت بیشتر را عامل تغییر یافت روسازی دانسته اند. از طرفی رطوبت هوای بیشتر، باعث کاهش انتشار صوت شده است [۴۰]. سرعت و جهت باد نیز به عنوان پارامترهای مرتبط با عوامل جوی، موجب تغییر در سطوح نویز شده است. سیامکومار و همکاران [۳۳] دریافتند که هنگامی که جهت باد به سمت ابزار اندازه گیری نویز باشد، میزان نویز بین ۱ تا ۲ دسی بل افزایش یافته است و هنگامی که جهت باد از ابزار سنجش، دور باشد، ۱ تا ۲ دسی بل کاهش یافته است.



جدول ۱. پارامترهای تاثیرگذار بر نویز حاصل از اندرکنش تایر و روسازی

Table 1. Parameters influencing tire-pavement interaction noise (TPIN)

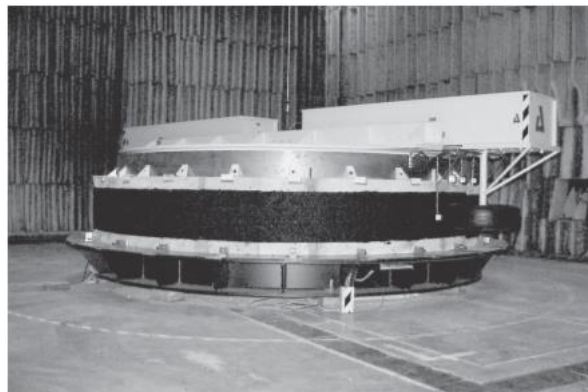
شماره	پارامترهای تاثیرگذار	نحوه‌ی تاثیر پارامتر تاثیرگذار مربوطه بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی	منابع	
۱	نوع روسازی	میزان نویز تولید شده در روسازی بتنی بیشتر از روسازی آسفالتی است و به طور کلی روسازی‌های آسفالتی کمترین سطوح نویز را تولید می‌کنند.	[۳۵-۳۲]	
	ریز بافت (micro-texture)	تاثیر متناقض میکروتکسچر بر نویز، نشان دهنده عدم وجود رابطه مستقیم میان میکروتکسچر و نویز تولید شده است	[۴۰ و ۳۶]	
۲	بافت سطح روسازی	درشت بافت (macro-texture)	در فرکانس‌های پایین و محدوده طول موج بافت ۱۰ الی ۵۰ میلی‌متر، نویز با افزایش درشت بافت، افزایش می‌یابد. در فرکانس‌های بالا و محدوده طول موج بافت ۰.۵ الی ۱۰ میلی‌متر، با افزایش درشت بافت، نویز کاهش می‌یابد.	[۴۴-۴۲ و ۴۰]
	مگانکسچر (mega-texture)	مستقیم	[۴۵ و ۴۰]	
	ناهمواری (roughness)	تاثیر ناهمواری بر نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی ناچیز است	[۴۰]	
۳	درصد فضای خالی روسازی	رابطه معکوس	[۴۰]	
۴	پیرشدگی	رابطه مستقیم	[۴۸]	
۵	عرض تایر	رابطه مستقیم	[۵۰ و ۴۰]	
۶	سختی لاستیک	رابطه مستقیم	[۵۲ و ۵۱]	
۷	افزایش عمر و ساییدگی لاستیک	نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، با افزایش ساییدگی لاستیک افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.	[۵۶-۵۳]	
۸	دمای هوا	رابطه معکوس	[۶۰-۵۹]	
۹	رطوبت هوا	رابطه معکوس	[۴۰]	
۱۰	جهت باد	در صورتی که جهت باد به سمت ابزار اندازه‌گیری نویز باشد، میزان نویز بین ۱ تا ۲ دسی بل افزایش می‌یابد هنگامی که جهت باد از ابزار اندازه‌گیری دور باشد، میزان نویز بین ۱ تا ۲ دسی بل کاهش می‌یابد.	[۳۳]	
۱۱	سرعت وسیله نقلیه	رابطه مستقیم	[۶۲ و ۴۰]	



ساختار استوانه دوار داخلی روش استوانه آزمایشگاهی [۶۹]



ساختار استوانه دوار خارجی روش استوانه آزمایشگاهی [۶۸]



ساختار استوانه ثابت خارجی روش استوانه آزمایشگاهی [۷۰]

شکل ۶. ساختار استوانه ها در روش های استوانه آزمایشگاهی [۶۸-۷۰]

Fig. 6. Structure of drums in laboratory drum methods [68-70]

قابل انجام است. پارامترهای آزمایش را به طور دقیق میتوان کنترل کرد و تأثیر عوامل محیطی را بر نتایج آزمایش برطرف ساخت [۸]. این روش با توجه به نوع استوانه‌ی مورد استفاده، به سه دسته ی استوانه دوار خارجی، استوانه دوار داخلی و استوانه ثابت خارجی مطابق شکل ۶ تقسیم شده است [۱۴].

روش استوانه دوار خارجی شامل لاستیک و استوانه است. لاستیک بر روی سطح خارجی استوانه می‌گلتند و سطح خارجی استوانه از فولاد صاف و هموار ساخته شده است که این سطح، تفاوت زیادی با سطح روسازی واقعی دارد. در این روش از میکروفن‌هایی برای ضبط نویز مشابه روش‌های اندازه‌گیری نزدیک و روش تراکم صوت در تخته استفاده شده است.

روش استوانه دوار داخلی شامل یک استوانه، یک مجموعه چرخ و روسازی آزمایشی است که رویه ی روسازی آزمایشی بر روی سطح داخلی استوانه نصب شده است و لاستیک بر این سطح می‌گلتند. روش استوانه

#### ۴-۱- روش های آزمایشگاهی

روش های مختلف آزمایشگاهی برای ارزیابی خواص صوتی روسازی‌ها توسعه داده شده است. در روش های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری صوت در محیط آزمایشگاه و بر روی نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه و با شرایط قابل کنترل صورت گرفته است [۱۳ و ۱۶]. نتایج به دست آمده از این روش‌ها دقیق و قابل تکرار است. نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که روش های آزمایشگاهی به درستی شرایط واقعی را شبیه‌سازی نمی‌کند [۶۴].

#### ۴-۱-۱- روش استوانه آزمایشگاهی (Laboratory drum)

روش های آزمایشگاهی دارای قابلیت کنترل دقیق پارامترهایی مانند سرعت و بارگذاری و همچنین حذف عوامل ناخواسته از جمله تغییرات شرایط جوی است [۸]. روش استوانه آزمایشگاهی در یک محفظه بدون انعکاس

و نمونه های استوانه ای در انتهای دیگر لوله نصب می گردند [۷۲]. بلندگو با طی کردن یک محدوده فرکانس مشخص، امواج صفحه ای را در لوله ایجاد می کند [۷۱]. دو میکروفون در دو طرف بلندگو در داخل لوله قرار داده شده است [۱۶]. زمانی که امواج صوتی به صورت امواج صفحه ای به سطح نمونه برخورد می کنند، بخشی از امواج صوتی توسط نمونه جذب شده و بخش دیگر امواج صوتی، توسط سطح نمونه، منعکس می گردند و امواج منعکس شده را تشکیل داده اند. سپس فشار صدا و فرکانس های صوتی تولید شده توسط امواج منعکس شده به وسیله ی دو پروب نصب شده در لوله، اندازه گیری می شوند. از سیگنال های جمع آوری شده توسط دو پروب می توان برای محاسبه نسبت مقاومت و ضریب جذب صدای نمونه استفاده کرد [۷۲]. نتایج تحقیقات براساس روش لوله آمپدانس و ضریب جذب صدا به عنوان شاخص ارزیابی نشان داده است که تغییر در تخلخل، ضخامت و سایر پارامترهای حجمی روسازی بر عملکرد جذب صدای روسازی تأثیرگذار بوده است [۷۳ و ۷۴ و ۷۵]. امواج صدای سینوسی توسط بلندگو تولید شده و از نمونه آزمایش منعکس می گردند. برهم نهی امواج منتشر شده و امواج منعکس شده، یک موج نیمه ایستاده را تشکیل می دهد. سپس میکروفون پروب برای اندازه گیری حداکثر و حداقل دامنه فشار صوت موج ایستاده، در امتداد لوله منتقل می شود. از این مقادیر، نسبت موج ایستاده و در نتیجه، ضریب جذب صدای ماده محاسبه می شود.

به دلیل طول کافی لوله آمپدانس و کم عمق بودن زاویه ی برخورد امواج صوتی، امواج صوتی تولید شده توسط بلندگو را می توان امواج صفحه ای درون لوله نامید. بنابراین این روش تنها قادر است که ضریب جذب صدای مواد با امواج دارای زاویه عمودی را اندازه گیری نماید. این روش، قابلیت اندازه گیری ضریب جذب صوت برای امواج با سایر زوایا را نداشته است. در نتیجه با توجه به اینکه آلودگی صوتی ناشی از اندرکنش لاستیک و روسازی از زوایای متفاوت و به صورت نامنظم پخش می گردد، محدودیت هایی در اندازه گیری ضریب جذب صدا با استفاده از روش لوله آمپدانس وجود دارد [۱۳].

موسر و همکاران دریافتند که اگر قطر لوله نسبت به طول موج کم باشد، امواج صوتی فقط در جهت طولی منتشر خواهند شد [۷۶]. وانگ و همکاران [۶] دریافتند که ضریب جذب صوت قابل اندازه گیری با این روش، به عنوان تابعی از فرکانس در نظر گرفته می شود که محدوده فرکانس ممکن است با تغییر قطر لوله و یا تغییر فاصله بین میکروفون ها، تعدیل گردد.

ثابت خارجی که به صورت گسترده در مطالعه ی نوین حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی مورد استفاده قرار گرفته است از یک استوانه ثابت، رویه ی روسازی آزمایشی و لاستیک تشکیل شده است. رویه روسازی آزمایشی بر سطح خارجی استوانه چسبانده شده است و در طول آزمایش، لاستیک بر روی آن می غلتد. میکروفن ها نیز بر بازوهای چرخان که به لاستیک متصل هستند، نصب شده است [۱۳ و ۱۴].

مقایسه ی این سه روش نشان داده است که سرعت لاستیک در روش استوانه دوار داخلی به علت استفاده کامل از نیروی گریز از مرکز، از سرعت لاستیک در روش استوانه ثابت خارجی بیشتر است. همچنین روش استوانه دوار خارجی در مقایسه با دو روش دیگر از شبیه سازی شرایط واقعی دورتر است زیرا در این روش از رویه ی روسازی آزمایشی استفاده نشده است [۱۳ و ۱۴].

کوکاک و همکاران [۶۷] یک مدل فیزیکی به نام تپانوس (TIPANOS) در راستای شبیه سازی و اندازه گیری نوین حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در آزمایشگاه توسعه دادند. این مدل، متشکل از یک لاستیک آزمایشی است که روی نمونه آسفالت استوانه ای (قطر ۱۰۰ میلی متر و طول ۱۵۰ میلی متر) می چرخد و یک میکروفون میان لاستیک و نمونه آسفالتی در فاصله ۲۵۰ میلی متری قرار گرفته است. در این مدل، اطلاعات صدا به مدت ۱۰ ثانیه ذخیره می شود. سه نمونه ی آسفالتی با مخلوط های مشابه آماده شد. این آزمایش در دمای ۲۲ درجه انجام شده است. تفاوت سطح استوانه با سطح واقعی جاده آنست که در این روش، در هر چرخش، سطح استوانه به صورت دوره ای و در روش واقعی، سطح جاده، به صورت تصادفی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل از این روش مشابه نتایج آزمون میدان نزدیک است. در این روش، هم نوین میدان نزدیک قابل اندازه گیری است و هم نوین منتشر شده از لاستیک، مکانیزم صدای روسازی با لاستیک و تأثیر عوامل مختلف قابل ارزیابی است [۱۴].

#### ۴-۱-۲ روش لوله آمپدانس (Impedance tube method)

روش لوله آمپدانس در راستای اندازه گیری ضریب جذب صدا و ارزیابی عملکرد جذب صدا به کار رفته است [۶، ۷۱]. این روش توانسته به صورت موثر عملکرد جذب صدای مواد مختلف را ارزیابی نماید. ساختار دستگاه لوله آمپدانس از لوله ای دایره ای با مقطعی یکنواخت و دیواره ی داخلی صاف تشکیل شده است. بلندگویی در یک انتهای لوله برای شبیه سازی منبع صدا

#### ۴-۲-۱- روش های عبوری (Pass by methods)

روش های عبوری به دو دسته ی روش های عبوری آماری و عبوری کنترل شده، قابل تقسیم است.

#### ۴-۲-۱-۱- روش عبوری آماری (Statistical Pass-by (SPB) method)

روش عبور آماری در راستای اندازه گیری میانگین نویز ترافیک در یک بخش مشخص از روسازی مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. این روش معمولاً برای مقایسه خصوصیات صوتی روسازی های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، از یک سرعت سنج برای اندازه گیری سرعت و یک میکروفون نصب شده بر روی سه پایه در ارتفاع ۱/۲ متر در فاصله ۷/۵ (اروپا) و یا ۱۵ متر (آمریکا) از مرکز خط ترافیک برای اندازه گیری سطوح صدا، استفاده شده است. حداکثر سطح فشار صوت، نوع و سرعت خودرو برای حداقل ۱۰۰ ماشین سواری و ۸۰ وسیله نقلیه سنگین که از نظر آماری قابل توجه است، به صورت تصادفی و جداگانه ثبت شده است. در راستای تعیین میانگین سطح فشار صوت (SPL) در همان سرعت مورد نظر، یک اصلاح سرعت اعمال شده است. سپس شاخص عبوری آماری (SPB) با استفاده از فاکتورهای وزنی ۷۰٪ اتومبیل، ۷/۵٪ وسایل نقلیه سنگین دو محور و ۲۲/۵٪ وسایل نقلیه سنگین چند محور محاسبه شده است. در این روش، انتشار واقعی سر و صدای ترافیک به شکل مناسب نشان داده شده است [۱۴ و ۱۶].

در مقایسه با سایر روش های اندازه گیری نویز، در روش عبور آماری، نویز داخلی (صدای موتور و اگزوز)، نویز آیرودینامیکی و نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی قابل اندازه گیری است [۱۳، ۱۶، ۱۷]. مدت زمان انجام این روش، نسبت به سایر روش ها بیشتر است [۱۶]. همچنین نویز اندازه گیری شده به کمک این روش، شامل نویز تولید شده توسط خودروهای عبوری از آن مسیر با لاستیک های مختلف و شرایط مختلف است. مشخصات وسایل نقلیه و لاستیک آن ها در گذر زمان دچار تغییرات زیادی شده است.

در روش هایی همچون روش تراکم صوت در تخته و اندازه گیری نزدیک به علت استفاده از تجهیزات استاندارد برای آزمایش، وابستگی به نوع وسایل نقلیه و لاستیک خودرو وجود نداشته است [۴۸]. در نتیجه، روش عبور آماری به عنوان بهترین روش برای اندازه گیری نویز مخرب بر سلامت ساکنان اطراف بزرگراه ها، شناخته شده است [۱۷].

ولکسن [۷۷] استفاده از روش لوله آمپدانس توسعه یافته با سه عدد میکروفون را پیشنهاد داده است که میتواند برای اندازه گیری آنی مطابق با استانداردهای فعلی اندازه گیری نویز بر روی سطح جاده مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل شده در این روش، قابل قبول و منطقی تر است.

#### ۴-۱-۳- روش سقوط لاستیک (Tire drop)

روش سقوط لاستیک به عنوان روش سقوط عمودی لاستیک نیز شناخته شده است. در روش سقوط عمودی لاستیک، یک لاستیک آزمایشی استاندارد به صورت آزادانه از ارتفاع مشخصی سقوط می کند و صدای تولید شده هنگام برخورد تایلر به روسازی را شبیه سازی می کند. در این روش، صدای میان روسازی و لاستیک توسط میکروفون اندازه گیری شده و سپس ویژگی های کاهش نویز مواد روسازی تجزیه و تحلیل می گردد [۱۳]. هان سن و همکاران [۷] عملکرد کاهش نویز روسازی سنگی را با استفاده از روش سقوط عمودی لاستیک مورد تحقیق قرار دادند. نتایج نشان داده است که استفاده از روش سقوط قائم برای ارزیابی ویژگی های کاهش صدای روسازی، معقول و عملی است.

در سالهای اخیر محققان دریافته اند که در روش سقوط قائم، لاستیک تنها به صورت عمودی روی سطح روسازی تاثیر داشته و نویز تولید شده توسط لاستیک در هنگام غلتک خوردن افقی به صورت کامل شبیه سازی نشده است. می توان گفت که فرآیند اندازه گیری صوت با استفاده از این روش، تحت تاثیر شرایط محیطی نبوده است. همچنین در مقایسه با اندازه گیری صوت با روش لوله آمپدانس (که تنها می تواند ضریب جذب صوت برای امواج دارای زاویه عمودی را اندازه گیری کند)، در روش سقوط لاستیک، میزان صدا برای امواج با زوایای مختلف قابل اندازه گیری است. همچنین عملکرد میرایی ارتعاش مواد روسازی قابل اندازه گیری است. در نتیجه نتایج آزمایش به شرایط واقعی جاده نزدیکتر است.

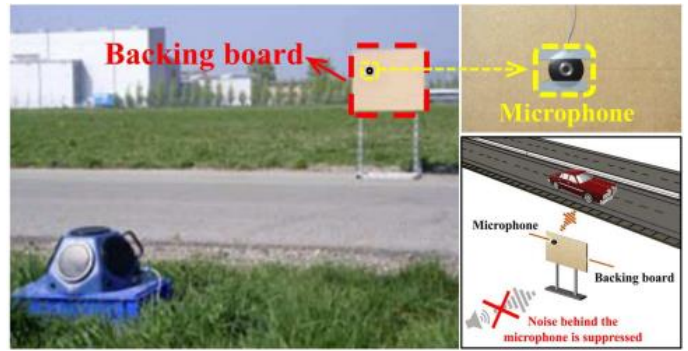
#### ۴-۲- روش های اجرایی

با استفاده از روش های اجرایی مطابق شکل ۷، میتوان سطوح صدای تولید شده در جاده ها را اندازه گیری کرد. در این روش ها، سطوح صوت میتواند با استفاده از میکروفن های داخلی در حال حرکت و هم میکروفن های ثابت، اندازه گیری شوند. نویز بر اساس سطح فشار صوت  $A$ -weighted<sup>1</sup> و بر حسب دسی بل بیان می شود [۱۶]. با استفاده از این روش ها، علاوه بر سطوح صدا، میتوان میزان جذب صدا را مورد اندازه گیری قرارداد.

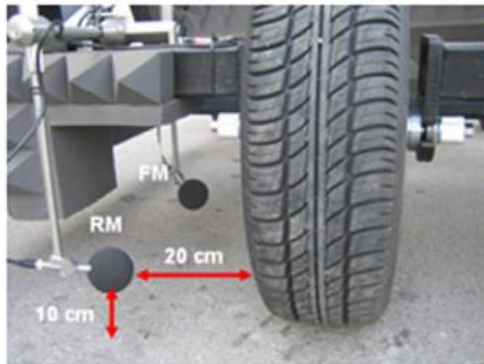
1 -A-weighted sound pressure level (SPL)



نمونه ای از ابزار اندازه گیری عبوری آماری [۸۰]



تجهیزات روش عبوری آماری اصلاح شده [۷۸]



نمونه ای از تجهیزات و ساختار روش اندازه گیری نزدیک [۸۲]



(ب)



(الف)

شکل ۷. روش های اجرایی در اندازه گیری مقدار نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی [۷۸، ۸۰، ۸۲ و ۸۴]

Fig. 7. Field methods in tire-pavement interaction noise (TPIN) measurement [78,80,82,84]

حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی متمرکز بوده است [۱۰ و ۱۴ و ۱۶ و ۱۷]. این روش برپایه اندازه گیری‌های میدان نزدیک فشار صوت استوار است و نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را در منبع نویز میدان نزدیک اندازه‌گیری می‌کند [۱۳ و ۱۷]. در روش اندازه‌گیری نزدیک، لاستیک آزمایشی بر روی یک یدک‌کش، قرار گرفته و با سرعت مشخص در پشت یک خودروی آزمایشی، کشیده می‌شود. به طور معمول دو میکروفون در نزدیکی لاستیک، در راستای اندازه‌گیری میانگین سطح فشار صوت منتشر شده توسط لاستیک مرجع، قرار داده می‌شوند [۱۴، ۱۶]. این دو میکروفون در لبه‌های ابتدایی و انتهایی محل تماس نصب شده است [۱۳، ۱۴]. در یک روش اصلاح شده ی اندازه‌گیری نزدیک، یک محفظه ی پوششی با مواد جاذب صوت به یدک‌کش، اضافه شده است که در اطراف میکروفون‌ها و لاستیک آزمایش متصل شده است. این محفظه، صدای ناشی از باد و نویز ترافیکی خارجی را کاهش داده و در نتیجه، دقت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد [۱۴ و ۱۶ و ۸۱].

بنرت و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۰۵، مقدار سطح نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را با استفاده از روش اندازه‌گیری نزدیک در راستای بررسی تاثیر نوع سطح روسازی بر نویز تولید شده را مورد ارزیابی قرار دادند. تجهیزات این آزمایش شامل میکروفون‌هایی هستند که در فاصله ۸ اینچ ( ۲۰/۳ سانتی‌متر) از مرکز لاستیک و ۴ اینچ ( ۱۰/۲ سانتی‌متر) بالای سطح روسازی و در داخل یک محفظه صوتی نصب شده است. این محفظه، ترافیک عبوری را از نویز لاستیک با روسازی جدا می‌سازد. کلیدین و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش اندازه‌گیری نزدیک، سطح نویز تولید شده از حرکت لاستیک آزمایشی بر روی روسازی را مورد اندازه‌گیری و عملکرد صوتی روسازی را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش، سطح نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی به عنوان میانگین حسابی سطوح فشار میکروفون در سرعت معین ۸۰ کیلومتر بر ساعت تعیین شده است. میانگین سطح نویز تولید شده از اندرکنش لاستیک با روسازی برابر با ۹۷،۲ دسی بل با انحراف معیار ۱،۳۸ به دست آمده است.

نابن و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ تحقیقی برای توصیف سطوح نویز در بزرگراه‌های بزرگ انجام دادند. از روش اندازه‌گیری نزدیک برای تعیین سطوح نویز استفاده شد. اندازه‌گیری نویز در سرعت مرجع ۸۰ کیلومتر بر ساعت و برای بخش‌هایی با طول حداقل ۲۰۰ متر صورت گرفته است. چهار میکروفون در داخل یدک‌کش و در نزدیکی لاستیک‌های آزمایشی نصب شده است. یدک‌کش دارای محفظه‌ای در راستای کاهش صدای باد و نویز

روش عبوری آماری متعارف، برای شرایطی با جریان تردد کم ترافیک، مناسب است. میکروفون جمع‌کننده سیگنال، در کنار جاده ثابت شده است و به راحتی تحت تأثیر سر و صدای محیطی قرار می‌گیرد. در نتیجه امروزه روش‌های اصلاح شده ی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]. حیدر و همکاران [۷۸] و گونزالس و همکاران [۷۹] روش عبوری آماری اصلاح شده با استفاده از تخته پشتیبان را توسعه داده‌اند. در این روش به جای قرار دادن میکروفون به صورت آزاد، آن را بر روی یک تخته پشتیبان قرار داده و این تخته، نویز پشت میکروفون را مهار می‌نماید. باید توجه داشت که روش‌های عبوری آماری و روش‌های اصلاح شده ی آن، نمی‌تواند تأثیر سر و صدای محیطی را به طور کامل بر نتایج آزمایش بی‌اثر نماید [۱۳].

#### ۴-۲-۱-۲- روش عبوری کنترل شده (Controlled Pass-By (CPB) (method

این روش مشابه روش عبوری آماری است. به جای جریان ترافیکی کنترل نشده، از وسایل نقلیه آزمایشی استفاده شده است [۱۴]. در این روش، امکان نظارت بر فاکتورهایی مانند سرعت، بار وسایل نقلیه، تعداد آزمایشات انجام شده توسط هر وسیله نقلیه، نوع و ساییدگی لاستیک‌ها، نویز ایجاد شده توسط موتور و بررسی شرایط سطحی روسازی، وجود دارد [۱۶]. وسیله نقلیه آزمایشی می‌تواند تحت شرایط رانندگی با سرعت ثابت، افزایشی و کاهش‌ی باشد. در نهایت، حداکثر سطح فشار صوت، برای چندین عبور از یک وسیله نقلیه آزمایشی تحت شرایط عملیاتی یکسان ثبت می‌شود [۱۴]. تفاوت روش عبوری آماری (SPB) و روش عبوری کنترل شده (CPB) آن است که در روش عبوری کنترل شده، نیاز به کنترل وسیله نقلیه آزمایشی داشته و در روش عبوری آماری، برای محاسبه شاخص آزمایش، باید تعداد خودروهای عبوری را مورد شمارش قرارداد و سیگنال‌های خودروهای عبوری را جمع‌آوری کرد [۱۳]. همچنین روش عبوری کنترل شده، دارای محدودیت‌های مکانی مشابه روش عبوری آماری است. برای تراکم کم ترافیکی مناسب است و در نتیجه، بیشتر مناسب شرایط روستایی یا مسیرهای آزمایشی است [۱۴ و ۱۷].

#### ۴-۲-۲- روش اندازه‌گیری نزدیک (Close Proximity (CPX) (method

یکی از روش‌های پرکاربرد در بررسی نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، روش اندازه‌گیری نزدیک است. این روش بر اندازه‌گیری نویز

حاصل از اندازه گیری نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی با استفاده از روش تراکم صوت در تخته و ترکیب آن با نتایج مربوط به بافت روسازی، تاثیرگذاری بافت روسازی بر نویز اثبات شده است [۸۴]. مزایا و معایب روش‌های اندازه‌گیری سطوح نویز ترافیکی به صورت خلاصه در جدول ۲ بیان شده است.

### ۵- نقشه آلودگی صوتی (Noise map)

نقشه های صوتی، در راستای تحلیل آلودگی های صوتی تهیه شده است. تشخیص در زمان صحیح و برنامه ریزی های مدیریتی با تحلیل نقشه های صوتی قابل انجام است. همچنین نقشه صوتی به منظور جمع‌آوری اطلاعات سطوح نویز در راستای تخمین تعداد افراد تحت تاثیر نویز نیز می‌تواند مفید باشد. در نتیجه با توجه به اهمیت تهیه‌ی نقشه آلودگی صوتی، مفهوم و روش‌های تهیه‌ی آن تشریح شده است. نقشه آلودگی صوتی یک نمایش گرافیکی از توزیع سطوح صدا و انتشار امواج صوتی در یک حوزه مکانی معین و برای یک بازه زمانی مشخص است. هدف اصلی از تشکیل نقشه صوتی، تشخیص آلودگی صوتی در یک منطقه مشخص است. برای محاسبه سطوح صوت در ابتدا باید یک میانگین طولانی مدت از میزان نویز در مدت زمان بیشتری اندازه گیری گردد. معمولاً تهیه نقشه نویز بر اساس مدل های محاسباتی نویز در یک منطقه انجام می شود.

براوو و همکاران [۲۲] با استفاده از نرم افزار پیشبینی Cadna-A ۷.2017 و با محاسبه سطوح نویز در نقاط گیرنده در شبکه شطرنجی ۱۰×۱۰ متر مربع و در ارتفاع ۴ متر و با کمک فرآیند درون یابی فضایی، یک نقشه صوتی ساختند. سطوح نویز در طول روز از ساعت ۷:۰۰ تا ۲۱:۰۰ و شب از ساعت ۲۱:۰۰ تا ۷:۰۰، به دست آمده است.

پارک و همکاران [۸۵] در راستای تعیین نقشه صوتی، دو مرحله را در نظر گرفته اند. مرحله اول، شامل توسعه یک مدل شهری سه بعدی و مرحله دوم شامل استفاده از یک مدل انتشار صوت است. مدل شهری سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار Sound Plan ایجاد شده است. این نرم‌افزار، ارتفاع سطوح زمین را بر اساس یک شبکه‌ی مثلث بندی نامنظم محاسبه می‌کند. همچنین برای محاسبه‌ی ارتفاع ساختمان‌ها از داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از سنسور لیدار با بهره گیری پرتوهای مادون قرمز استفاده شده است. شکل ۸، نقشه‌های شبکه‌ای سطوح نویز ترافیکی شهر گوانگجو را نشان داده است که در ارتفاع ۱٫۵ متری از سطح زمین برای روز و شب پیش بینی شده است. پارک و همکاران با توجه به این نقشه دریافتند که

ترافیکی وسایل نقلیه مجاور است. در نهایت میانگین سطح فشار صوتی در هر بخش تعیین می گردد. همچنین برای مقایسه ی نتایج، این آزمایش با استفاده از روش عبوری کنترل شده نیز تکرار شده است و نتایج حاصل از هر دو روش دارای همبستگی بالایی می باشند ( $R^2=0.97$ ). با توجه نتایج تحقیقات مختلف، روش اندازه گیری نزدیک، یک روش خوب و سریع برای اندازه گیری نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی و نظارت بر وضعیت روسازی است [۱۷ و ۱۴]. اگرچه ویژگی های میدان نزدیک به دلیل نویز با فرکانس پایین از منابع مستقیم باعث ایجاد برخی خطاها شده است و جذب صوت توسط رویه‌ی روسازی ممکن است ناچیز در نظر گرفته شود [۱۷]. روش اندازه گیری نزدیک اولین روش پردازشی بوده است که همبستگی خوبی با روش های عبور و مرور و روش تراکم صوت در تخته داشته است [۷۸]. هدف این روش، ارزیابی نویز ترافیکی ناشی از تماس بین لاستیک و سطح جاده است [۱۶].

### ۱-۲-۳-۴- روش تراکم صوت در تخته (On-Board Sound Intensity) (OBSI) method

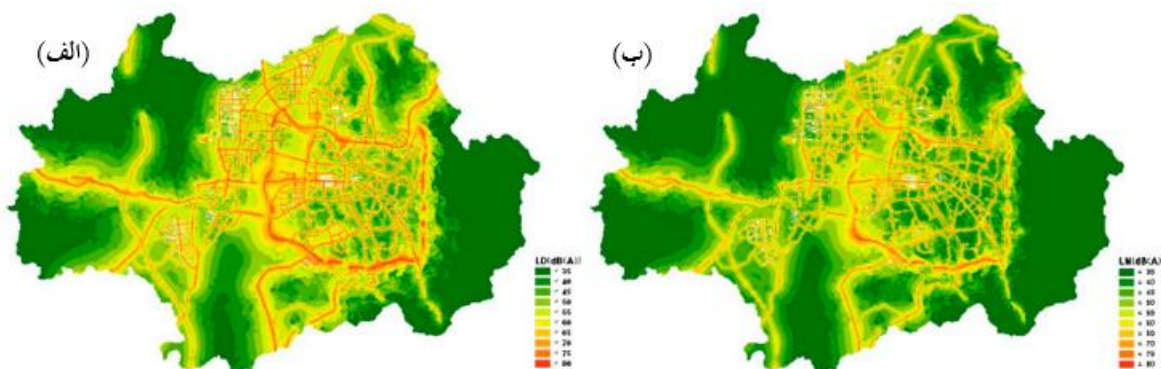
این روش مشابه روش اندازه گیری نزدیک است و نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، در نزدیکی منبع تولید صدا اندازه گیری می‌شود [۱۶]. در روش تراکم صوت در تخته، میکروفن‌های پروب دوگانه (میکروفن های لبه ابتدایی و انتهایی) برای اندازه گیری سطح شدت صوت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳ و ۱۴]. در این روش، میکروفن‌ها به گونه‌ای تعبیه شده است که نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی از نویز سایر منابع جدا شده و آزمایش بر نویز تولید شده در نزدیکی سطح تماس لاستیک با روسازی متمرکز است [۱۶]. استاندارد آشتو TP-76 (۲۰۱۳) نشان داد که پروب ها را می‌توان به صورت دوگانه در اندازه گیری همزمان و یا به صورت تکی در یک زمان (ابتدا برای اندازه گیری در لبه جلو و سپس در لبه عقب) نصب کرد [۸۳]. از تفاوت های روش اندازه گیری نزدیک و روش تراکم صوت در تخته، می‌توان به موقعیت نصب متفاوت میکروفن ها اشاره کرد. همچنین روش تراکم صوت در تخته بر خلاف روش اندازه گیری نزدیک می‌تواند جهت منابع صوتی را شناسایی نماید [۱۴]. نتایج تحقیقات و تجربیات گوناگون نشان داد که لاستیک آزمایشی، سرعت وسیله نقلیه و نویز خودرو از فاکتورهای تاثیرگذار بر نتیجه ی این آزمایش هستند [۸۴]. با توجه به استاندارد موجود، سرعت خودرو برابر با ۶۰ مایل بر ساعت (۹۶ کیلومتر بر ساعت) در نظر گرفته شده است [۱۶، ۸۴]. با توجه به نتایج

جدول ۲. مزایا و معایب روش‌های اندازه‌گیری سطوح نویز ترافیکی

Table 2. Advantages and disadvantages of traffic noise measurement methods

منابع	معایب	مزایا	روش اندازه‌گیری	دسته‌بندی
[۱۴ و ۸]	سطح واقعی جاده به صورت تصادفی تغییر می‌کند. در این روش، سطح ماده به صورت دوره‌ای آزمایش می‌شود و این می‌تواند نتایج را از واقعیت دور نماید.	۱) امکان کنترل دقیق پارامترهای آزمون ۲) امکان کاهش تأثیر عوامل محیطی بر نتایج آزمایش ۳) ارزیابی جامع ظرفیت نویز منتشر شده از لاستیک، نویز حاصل از اندرکنش روسازی با لاستیک و تأثیر عوامل مختلف علاوه بر اندازه‌گیری نویز میدان نزدیک را دارد	استوانه دوار خارجی استوانه دوار داخلی استوانه ثابت خارجی	روش استوانه آزمایشگاهی
[۷۲ و ۱۳]	این روش فقط قابلیت اندازه‌گیری ضریب جذب صوت برای امواج با زاویه عمودی را دارد.	۱) ارزیابی موثر عملکرد جذب صوت ۲) حصول نتایج مطلوب	روش لوله آمپدانس	روش‌های آزمایشگاهی
[۱۳ و ۷]	عدم شبیه‌سازی سر و صدای تولید شده توسط تایر در هنگام غلتک خوردن افقی	۱) شبیه‌سازی مناسب وضعیت واقعی تولید صدا ۲) روشی معقول و عملی برای ارزیابی ویژگی‌های کاهش صدای روسازی ۳) اندازه‌گیری میزان صوت برای امواج با زوایای مختلف	روش سقوط عمودی لاستیک روش سقوط غلتکی با سرعت لاستیک	روش سقوط لاستیک
[۴۸ و ۱۶ و ۱۴ و ۱۳]	۱) زمان‌بر ۲) اندازه‌گیری نویز ترافیکی، نه فقط نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی ۳) مناسب برای جریان تردد کم ۴) حساس به آب و هوا	۱) نمایش انتشار واقعی سر و صدای ترافیک به شکل مناسب ۲) استفاده از خودروهای عبوری از مسیر به صورت تصادفی	روش عبوری آماری	روش‌های عبوری
[۱۷ و ۱۴ و ۱۳]	۱) نیاز به شرایط ترافیکی با تراکم پایین دارد، بنابراین در اکثر مواقع برای شرایط روستایی یا مسیرهای آزمایشی مناسب می‌باشد. ۲) استفاده از وسایل نقلیه آزمایشی به جای جریان ترافیکی کنترل نشده	امکان اندازه‌گیری نویز ترافیکی ناشی از وسایل نقلیه سنگین	روش عبوری کنترل شده	روش‌های اجرایی
[۱۷ و ۱۶ و ۱۴ و ۱۳]	۱) امکان ایجاد خطا ۲) امکان دست پایین گرفته شدن میزان جذب روسازی ۳) ناتوانی در اندازه‌گیری نویز ناشی از وسایل نقلیه سنگین	۱) دقیق و سریع در راستای اندازه‌گیری نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی ۲) عدم نیاز به نصب میکروفن در کنار جاده ۳) کاهش نویز محیط پیرامونی ۴) توانایی شناسایی خرابی‌های روسازی	روش اندازه‌گیری نزدیک	
[۱۶ و ۱۴ و ۱۳]	ناتوانی در اندازه‌گیری نویز ناشی از وسایل نقلیه سنگین	۱) توانایی شناسایی جهت منابع صوت ۲) عدم نیاز به نصب میکروفن در کنار جاده ۳) کاهش نویز محیط پیرامونی ۴) دقت بیشتر از روش اندازه‌گیری نزدیک	روش تراکم صوت در تخته	





شکل ۸. نقشه صوتی مناطق شهر گوانگجو: (الف) روز (ب) شب [۸۵]

Fig. 8. Guangzhou City noise map: a) day b) night [85]

کم صدا یا روسازی های کم صدا استفاده نمود. تحقیقات نشان داده است که روسازی پتانسیل بالاتری در کاهش نویز (۱۰ دسی بل) در مقایسه با لاستیک (۴ دسی بل) در سرعت ۶۰ مایل در ساعت، داشته است [۸۸-۸۹]. روسازی های کم صدا موجب کاهش نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در منبع ایجاد نویز شده است. کاهش نویز در این راهکار، به موقعیت نسبی منبع و گیرنده نویز بستگی نداشته است. همچنین با استفاده از روسازی های کم صدا، مانع بصری در مسیر ایجاد نمی گردد [۹۰]. در این بخش انواع روسازی های کم صدا مورد بررسی قرار گرفته اند.

#### ۶-۲-۱- آسفالت متخلخل (Porous asphalt (PA))

آسفالت متخلخل، عبارت است از یک مخلوط آسفالتی با سنگدانه های درشت و درصد زیاد فضای خالی به هم پیوسته که دارای اصطکاک بالا است، قابلیت تخلیه ی مناسب آب باران را دارد و نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را کاهش داده است. این نوع روسازی دارای دانه بندی باز و یا میان تهی است و درصد فضای خالی آن در حدود ۱۵ الی ۲۰ درصد است [۹۱ و ۹۲].

سطح آسفالت متخلخل دارای منافذ باز و به هم پیوسته است. امواج صوتی تولید شده توسط وسیله ی نقلیه با زوایای مختلف به سطح روسازی برخورد می کنند. برخی از این امواج مستقیماً از سطح روسازی منعکس می شوند. قسمت دیگری از این امواج از طریق منافذ باز سطح روسازی منتشر می شوند و وارد منافذ داخلی روسازی می شوند. هنگامی که امواج صوتی به طور مکرر در منافذ داخلی منتشر شده، باعث ارتعاشات هوا در منافذ

سطح بالایی از نویز در امتداد بزرگراه ها و جاده های شریانی شکل گرفته است و بالاترین سطح نویز ترافیکی در نزدیکی جاده های کمربندی شهری مشاهده شده است.

#### ۶- بررسی روش های کاهش انرژی صوت/نویز

##### ۶-۱- انگیزه کاهش انرژی صوت/نویز

شناخت روش های کاهش انرژی صوت و عوامل موثر بر کاهش نویز ترافیکی در راستای تعیین روش های جدید اندازه گیری انرژی صوتی و بهبود روش های متعارف، موثر است. همچنین آلودگی صوتی، یکی از مهمترین مشکلات زیست محیطی در سراسر دنیا است. اصوات بالای ۵۵ دسی بل میتواند منجر به بیماری های قلبی عروقی، اختلال شناختی و وزوز گوش گردد [۲۶]. تخمین زده شده است که سالانه آلودگی صوتی منجر به حدود ۹۱۰ هزار مورد ابتلا به فشار خون، ۴۳ هزار بیمار بستری در بیمارستان و حداقل ۱۰ هزار مرگ زودرس مرتبط با بیماری عروق کرونر قلب و سکته مغزی شده است [۸۶]. این موارد اهمیت بررسی روش های کاهش انرژی صوت را نشان داده است. کاهش نویز در منبع نسبت به کاهش صدا در مسیر انتشار صوت، هزینه کمتری داشته است. در نتیجه میتوان گفت که بهینه سازی خصوصیات سطح جاده در راستای کاهش نویز موثر است [۸۷].

##### ۶-۲- انواع روسازی های کم صدا

روش های متفاوتی در راستای کاهش آلودگی صوتی حاصل از اندرکنش بین لاستیک با روسازی وجود دارد. در این راستا میتوان از لاستیک های

لایه ی زیرین با گرد و غبار و شن و ماسه های درشت عمل نموده است [۱۷، ۹۱]. نتایج یک مطالعه در جاده های شهری دانمارک، کاهش نویز ۴ الی ۶ دسی بل را برای سطوح آسفالت متخلخل دو لایه نسبت به روسازی آسفالتی متراکم نشان داده است [۸۷].

#### ۶-۲-۲- سطح جاده پروالاستیک (Poroelastic road surface)

سطح جاده پروالاستیک مخلوطی است که از ۲۰ تا ۴۰٪ فضای خالی و حدود ۲۰٪ حجمی لاستیک و یا لاستیک های ضایعاتی ساخته شده است. مصالح سنگی و لاستیک با استفاده از قیر اصلاح شده با پلیمر و یا قیر پلی اورتان محصور شده است. امروزه بیشتر قیرهای اصلاح شده با پلی اورتان مورد استفاده قرار گرفته است که این نوع از مواد یک سطح الاستیک ساخته شده است که در راستای کاهش نویز حاصل از ارتعاش تولید شده توسط لاستیک های خودرو استفاده شده است [۸۹ و ۱۳].

عملکرد کاهش نویز در این نوع روسازی مبتنی بر جذب صدا و کاهش نویز آیرودینامیکی به علت تخلخل بالا و کاهش ارتعاش به دلیل خصوصیت ارتجاعی و الاستیسیته لاستیک موجود در مخلوط است [۹۳ و ۹۷]. کاهش نویز در سطح جاده پروالاستیک بر اثر دو مکانیزم کاهش نویز در روسازی متخلخل و مکانیزم کاهش نویز در روسازی لاستیکی، حاصل شده است [۱۳]. مطابق با تحقیقات میاراشی [۹۸] سطح جاده پروالاستیک باعث کاهش نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی بین ۵ تا ۱۵ دسی بل در مقایسه با سطوح آسفالت متراکم معمولی شده است. مطالعات نشان داده است که کاهش نویز حاصل از این نوع روسازی در مقایسه با روسازی آسفالتی متراکم، بین ۷ الی ۱۲ دسی بل متغیر است [۹۹-۱۰۱].

ادمونت و همکاران [۹۷] با اندازه گیری آزمایشگاهی سطوح نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در سطح جاده پروالاستیک دریافتند که سطوح A-weighted بر روی این سطح در همه ی سرعت ها کمتر از سایر سطوح است. همچنین کاهش نویز حاصل شده با استفاده از این روسازی با افزایش سرعت، بیشتر شده است. سنجش نویز در جاده و با استفاده از روش اندازه گیری نزدیک، نشان دهنده ی کاهش نویز سطح جاده پروالاستیک در حدود ۱۰ دسی بل در مقایسه با آسفالت سنگدانه ای است. با وجود تاثیر قابل توجه سطح جاده پروالاستیک در کاهش نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی و نقش موثر آن، در حال حاضر چنین روسازی هایی در بازار موجود نمی باشد [۸۷].

می شوند. مولکول های هوا باعث ایجاد اصطکاک در دیواره ی حفره ها و هدایت حرارتی شده است که به تدریج انرژی صوتی را به انرژی گرمایی تبدیل می کنند. بنابراین انرژی صوتی منعکس شده در گوش انسان نسبت به انرژی صوتی اصلی کمتر خواهد بود، زیرا انرژی صوتی در طول انتشار در روسازی به طور مداوم تبدیل و اتلاف شده است [۱۳ و ۹۱]. همچنین تخلخل با جلوگیری از فشرده سازی هوا، نویز ناشی از پمپاژ هوا را کاهش داده است [۱۳ و ۱۷].

نتیجه تحقیقات یو و همکاران [۹۲] حدود ۱/۵ تا ۴ دسیبل کاهش سطح صوت در آسفالت متخلخل در مقایسه با آسفالت سنگدانه ای و روسازی های متراکم را نشان داده است. با توجه به تحقیقات انجام شده در بزرگراه های کشور ژاپن، گزارش شده است که روسازی های آسفالتی متخلخل حتی با گذشت سه سال از ساخت روسازی، نسبت به روسازی های متراکم، ۳ دسی بل نویز کمتری منتشر می کنند [۸۷].

زنگ [۹۳] نشان داد که روسازی آسفالتی متخلخل میتواند نویز جاده را حدود ۳ الی ۶ دسی بل کاهش دهد. نتایج آزمایش های شناسایی نویز در فضای باز توسط لیو و همکاران [۹۱] نشان داد که روسازی متخلخل موجب کاهش ۳/۳ الی ۳/۶ دسی بل از نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در مقایسه با روسازی های آسفالتی متداول شده است. تحقیقات بسیاری از دانشمندان [۳۵، ۹۴-۹۶] بیانگر جذب صدای بیشتر آسفالت متخلخل در مقایسه با آسفالت متراکم بوده است. همچنین این نوع روسازی، صدای حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را به میزان کمتری منعکس می نماید. استفاده از آسفالت متخلخل در جاده های اصلی و با ترافیک پرسرعت، باعث کاهش قابل ملاحظه صدای حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی و در نتیجه کاهش انتقال صدا به مناطق مسکونی اطراف جاده شده است. همچنین باعث کاهش قابل توجه صدا به داخل خودرو و در نتیجه خستگی کمتر راننده می گردد [۸]. با وجود مزایای روسازی متخلخل و عملکرد مناسب آن در کاهش نویز، استفاده از این نوع روسازی با مشکلاتی همچون انسداد و گرفتگی منافذ، تضعیف عملکرد کاهش نویز در طولانی مدت و احتمال لغزش در شرایط یخ زدگی شده است [۱۳ و ۸۹].

محققین اروپایی در راستای مقابله با مشکل گرفتگی منافذ، کاربرد روسازی متخلخل دو لایه را پیشنهاد دادند [۱۷]. روسازی آسفالتی متخلخل دو لایه، از یک لایه ی زیرین شامل سنگدانه های درشت و فضای خالی زیاد و یک لایه ی سطحی متخلخل با سنگدانه های ریز تشکیل شده است [۸۷ و ۹۱]. لایه ی بالایی به عنوان یک الک برای جلوگیری از انسداد منافذ

نزدیک دریافتند که با افزایش درصد فضای خالی از ۹٪ به ۱۴٪، نویز حاصل شده در روسازی آسفالت سنگدانه‌ای در مقایسه با روسازی آسفالتی متراکم، در حدود ۲/۵ الی ۴ دسی‌بل، کاهش یافته است.

#### ۶-۲-۴- روسازی لاستیکی (Rubber Asphalt Pavement)

این نوع روسازی از افزودن پودر لاستیک به قیر یا افزودن قطعات لاستیک به مصالح سنگی در راستای افزایش خصوصیات ارتجاعی مخلوط ساخته شده است. افزودن پودر لاستیک به دو روش تر و خشک انجام شده است. در روش تر، پودر لاستیک با قیر مایع، مخلوط شده و در روش خشک، پودر لاستیک به مصالح سنگی در مخلوط اضافه می‌شوند [۱۰۷]. در مقایسه با روسازی‌های متعارف، روسازی لاستیکی می‌تواند ارتعاش عمودی لاستیک‌ها را ۹/۶۷ درصد کاهش دهد. تضعیف ارتعاش در روسازی‌های لاستیکی در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد، بیشتر از روسازی‌های آسفالتی متعارف است. در نتیجه روسازی لاستیکی دارای عملکردی میرایی و کاهش نویز است که منجر به کاهش نویز ناشی از ارتعاش لاستیک و روسازی شده است [۱۱۳].

کهاگیا و همکاران [۱۰۸] دریافتند که استفاده از روسازی لاستیکی، میزان نویز تولید شده را حدود ۱ تا ۳ دسیبل نسبت به روسازی متعارف، کاهش داده است. برنان و همکاران [۱۰۹] نشان دادند که روکش روسازی موجود با تراشه‌های لاستیکی، نویز ناشی از اندرکنش لاستیک با روسازی را تا ۵ دسیبل کاهش داده است.

از طرفی تحقیقات ژائو [۱۱۰] نشان داد که با افزایش مناسب اندازه و درصد قطعات لاستیکی در مخلوط آسفالتی، عملکرد رویه روسازی در کاهش ارتعاش و نویز بهبود یافته است. همچنین ذکر این نکته قابل توجه است که به علت هزینه‌های نسبتاً بالای این مخلوط لاستیکی، استفاده ی گسترده آن، محدود بوده است [۸۷].

#### ۷- مقایسه‌ی روش‌های مختلف اندازه‌گیری سطح نویز ترافیکی و انتخاب کارآمدترین روش با استفاده از مدل تاپسیس

به منظور مقایسه‌ی بهتر و انتخاب کارآمدترین روش اندازه‌گیری سطح نویز ترافیکی، هر یک از روش‌ها با توجه به معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از مدل تاپسیس تجزیه و تحلیل شدند. این مدل می‌تواند با استفاده از معیارهای موجود، گزینه‌های مختلف را رتبه‌بندی کند.

#### ۶-۲-۳- روسازی آسفالت سنگدانه ای (Stone Mastic Asphalt (SMA Pavement))

آسفالت سنگدانه ای، یک مخلوط متراکم دارای دانه بندی میان تهی است که دارای فضاهای خالی پر شده با قیر، تثبیت کننده و سنگدانه های ریزتر است [۱۳ و ۸۹ و ۱۰۲]. این مخلوط ها، طراحی شده اند که درصد فضای خالی کمی در حدود ۳ تا ۸ درصد داشته باشند [۱۳، ۱۰۲]. میزان ریزدانه در این مخلوط کاهش یافته است و دانه های درشت به یکدیگر متکی بوده و اتکای دانه به دانه، باربری روسازی را افزایش داده است [۱۰۳]. آسفالت سنگدانه ای، مدول دینامیکی کمتر و میرایی داخلی بیشتری نسبت به روسازی آسفالتی دارد. در نتیجه، میرایی ارتعاش لاستیک در این روسازی بیشتر از روسازی آسفالتی است که نویز ناشی از ارتعاش را کاهش می‌دهد. همچنین آسفالت سنگدانه ای دارای بافت سطحی زیادی است که می‌تواند نویز ناشی از پمپاژ هوا را کاهش دهد [۱۳].

با مطالعه ی تحقیقات مختلف، تاثیرات آسفالت سنگدانه ای در کاهش نویز ترافیکی مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات بافت روسازی و اندازه گیری نویز در بزرگراه های انگلستان توسط چندلر و همکاران [۱۰۴] نشان داد که آسفالت سنگدانه ای یک درمان سطحی بوده و گزینه ای امیدوار کننده برای کاهش نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی به خصوص در ۴ یا ۵ سال آغازین است.

واسکوز و همکاران [۱۰۲] نشان دادند که با توجه به ضرایب جذب صوتی به دست آمده برای دو نوع آسفالت سنگدانه ای ساخته شده در این تحقیق، نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی را کاهش نیافته است. به این علت که کاهش نویز در اثر جذب صوت، با درصد فضای خالی مخلوط مرتبط است. مقادیر بالای جذب صوت در مخلوط های با فضای خالی بالا مشاهده شده است. آسفالت سنگدانه ای به علت فضای خالی کم، ظرفیت جذب صوتی بالایی نداشته است.

از نتایج دیگر این تحقیق میتوان به عدم تاثیرگذاری حداکثر ساین سنگدانه ها بر جذب صوت و سختی دینامیکی روسازی اشاره داشت. نتایج تحقیقات واسکوز و همکاران [۱۰۵] نشان داد که آسفالت سنگدانه ای دارای مدول دینامیکی کمتر و میرایی داخلی بزرگتر نسبت به روسازی آسفالتی است. در نتیجه میتواند منجر به کاهش نویز گردد. همچنین آسفالت سنگدانه ای دارای بافت سطحی نیرومندی است که به صورت موثری باعث کاهش نویز شده است. گاردزبیک و همکاران [۱۰۶] با استفاده از روش اندازه گیری

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \right\}^{1/2}, (i=1,2,\dots,m)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \right\}^{1/2}, (i=1,2,\dots,m) \quad (۶)$$

در مرحله پنجم شاخص شباهت به گزینه ایده آل با استفاده از رابطه شماره ۷ به دست می‌آید.

$$C_i = \frac{d_i^-}{(d_i^- + d_i^+)}, (i=1,2,\dots,m) \quad (۷)$$

پس از محاسبه شاخص شباهت و در مرحله آخر، هر یک از گزینه‌ها با توجه به اینکه شاخص آن‌ها به عدد یک نزدیک‌تر باشد، رتبه‌بندی شده و بهترین و کارآمدترین گزینه مشخص شده است [۱۱۱].

در جدول شماره ۳ به شرح معیارهای مربوط به هر یک از روش‌های اندازه‌گیری نویز ترافیکی پرداخته شده است. از آنجایی که این معیارها کیفی بوده، با استفاده از مقیاس پنج نقطه ای آن‌ها را به مقادیر کمی از یک تا پنج تقسیم و ماتریس تصمیم مشخص شده است. پس از نرمال سازی ماتریس تصمیم، وزن اختصاص داده شده برای هر یک از معیارها برابر با ۰,۲ در نظر گرفته شده است. در جدول شماره ۴، ماتریس نرمال وزن‌دار به همراه مقادیر ایده آل مثبت و منفی و همچنین فاصله اقلیدسی هر یک از گزینه‌ها از مقادیر ایده آل مثبت و منفی نشان داده شده است. در جدول شماره ۵، مقادیر شاخص شباهت و رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف حاصل شده است.

تحلیل روش‌های مختلف اندازه‌گیری نویز ترافیکی با استفاده از مدل تاپسیس نشان داد که روش تراکم صوت در تخته در مقایسه با سایر روش‌ها کارآمدتر بوده و با توجه به معیارهای مورد بررسی، بهترین عملکرد را نشان داده است. روش اندازه‌گیری نزدیک در رتبه‌ی دوم قرار گرفته که یکی از روش‌های پر کاربرد در راستای اندازه‌گیری نویز بوده و نتایج مناسبی ارائه داده است. همچنین می‌توان نتایج این تحقیق را با روش الگوریتم سلسه مراتب فازی مورد مقایسه قرار داد [۱۱۲].

معیار رتبه‌بندی در این روش به این صورت است که باید گزینه‌ی انتخاب شده، کمترین فاصله از گزینه‌ی ایده آل مثبت ( $A_j^+$ ) و بیشترین فاصله از گزینه‌ی ایده آل منفی ( $A_j^-$ ) را داشته باشد. انتخاب بهترین گزینه با استفاده از این روش شامل مراحل مختلفی است. این مراحل با نرمال سازی ماتریس تصمیم آغاز می‌گردد. برای ساخت ماتریس جدید، همه‌ی درایه‌های ماتریس تصمیم بر یک عدد مشخص تقسیم شده و درایه‌های ماتریس نرمال سازی شده مطابق با معادله زیر تشکیل می‌شوند.

$$r_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}}, (i=1,\dots,m) \quad (۳)$$

در این مرحله ماتریس تصمیم نرمال سازی شده حاصل شده است. سپس وزن معیارهای مختلف با استفاده از معادله شماره ۴ به این ماتریس اختصاص داده می‌شود و ماتریس نرمال وزن‌دار حاصل می‌گردد.

$$V = N_D \times W_{n \times n} \quad (۴)$$

در مرحله سوم، گزینه‌های ایده آل مثبت و منفی با استفاده از رابطه شماره ۵ محاسبه می‌گردند.

$$A^+ = \left\{ (\max v_{ij} | j \in J_1), (\min v_{ij} | j \in J_2) | i=1,2,\dots,m \right\}$$

$$A^- = \left\{ (\min v_{ij} | j \in J_1), (\max v_{ij} | j \in J_2) | i=1,2,\dots,m \right\} \quad (۵)$$

که در این رابطه  $J_1$  مرتبط با معیارهایی است که تاثیر مثبت دارند و  $J_2$  مرتبط با معیارهایی است که تاثیر منفی دارند. در مرحله بعد، فاصله اقلیدسی از ایده آل مثبت و منفی برای همه‌ی گزینه‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

جدول ۳. بررسی معیارهای مختلف روش‌های اندازه‌گیری نویز ترافیکی

Table 3. Investigation of different criteria of traffic noise measurement methods

معیارها						دسته‌بندی
میزان شبیه سازی با شرایط واقعی	میزان تجهیزات مورد استفاده	تحت تأثیر پارامترهای محیطی	نزدیکی به منبع صوتی	مدت انجام آزمایش	روش اندازه‌گیری	
کم	استوانه آسفالتی- تایر آزمایشی- میکروفن(کم)	بسیار کم	نزدیک	بسیار کم (۱۰ ثانیه)	استوانه آزمایشگاهی	روش‌های آزمایشگاهی
کم	لوله- بلندگو- دو میکروفن (کم)	بسیار کم	متوسط	بسیار کم (کمتر از ۲۰ ثانیه)	لوله آمپدانس	
متوسط	تایر آزمایشی- میکروفن- محفظه انعکاسی (کم)	بسیار کم	متوسط	کم (۲۰ الی ۶۰ ثانیه)	سقوط لاستیک	
زیاد	تاکومتر برای اندازه‌گیری سرعت- میکروفن- رادار برای محاسبه تعداد خودروهای عبوری- سیستم آنالیز داده (بسیار زیاد)	زیاد	دور	زیاد	عبوری آماری	روش‌های اجرایی
زیاد	مشابه روش عبوری آماری (بسیار زیاد)	متوسط	دور	متوسط	عبوری کنترل شده	
زیاد	تایر آزمایشی- یدک- خودروی آزمایشی- دو میکروفن- محفظه پوششی (زیاد)	کم	بسیار نزدیک	بسیار کم (۴ الی ۶۰ ثانیه)	اندازه‌گیری نزدیک	
بسیار زیاد	خودروی آزمایشی- دو میکروفن پروب- محفظه پوششی (متوسط)	بسیار کم	بسیار نزدیک	کم	تراکم صوت در تخته	

جدول ۴. ماتریس نرمال وزن دار روش های اندازه گیری نویز ترافیکی با استفاده از مدل تاپسیس

Table 4. Weighted normalized matrix of traffic noise measurement methods using TOPSIS model

دسته بندی	روش اندازه گیری	معیارها					
		مدت انجام آزمایش	نزدیکی به منبع صوتی	تحت تأثیر پارامترهای محیطی	میزان تجهیزات به کار رفته	میزان شبیه سازی با شرایط واقعی	d- d+
روش های آزمایشگاهی	استوانه آزمایشگاهی	۰/۰۲۷۷	۰/۰۸۳۴	۰/۰۳۴۸	۰/۰۴۲۹	۰/۰۴۲۲	۰/۱۷۰۶
	لوله آمپدانس	۰/۰۲۷۷	۰/۰۶۲۶	۰/۰۳۴۸	۰/۰۴۲۹	۰/۰۴۲۲	۰/۱۶۶۷
	سقوط لاستیک	۰/۰۵۵۵	۰/۰۶۲۶	۰/۰۳۴۸	۰/۰۴۲۹	۰/۰۶۳۲	۰/۱۵۱۲
روش های اجرایی	عبوری آماری	۰/۱۳۸۷	۰/۰۴۱۷	۰/۱۳۸۳	۰/۱۰۷۲	۰/۰۸۴۳	۰/۰۴۲۲
	عبوری کنترل شده	۰/۱۱۰۹	۰/۰۴۱۷	۰/۱۰۴۴	۰/۱۰۷۲	۰/۰۸۴۳	۰/۰۶۱۳
	اندازه گیری نزدیک	۰/۰۲۷۷	۰/۱۰۴۳	۰/۰۶۹۶	۰/۰۸۵۸	۰/۰۸۴۳	۰/۱۵۲۷
	تراکم صوت در تخته	۰/۰۵۵۵	۰/۱۰۴۳	۰/۰۳۴۸	۰/۰۶۴۳	۰/۱۰۵۴	۰/۱۶۶۱
	A+	۰/۰۲۷۷	۰/۱۰۴۳	۰/۰۳۴۸	۰/۰۴۲۹	۰/۱۰۵۴	
	A-	۰/۱۳۸۷	۰/۰۴۱۷	۰/۱۳۹۳	۰/۱۰۷۲	۰/۰۴۲۲	

جدول ۵. رتبه بندی روش های اندازه گیری نویز ترافیکی با استفاده از مدل تاپسیس

Table 5. Ranking of traffic noise measurement methods using TOPSIS model

رتبه بندی	C	d-	d+	روش اندازه گیری	دسته بندی
۳	۰/۷۱۹۲	۰/۱۷۰۶	۰/۰۶۶۶	استوانه آزمایشگاهی	روش های آزمایشگاهی
۵	۰/۶۸۷۵	۰/۱۶۶۷	۰/۰۷۵۸	لوله آمپدانس	
۴	۰/۶۹۷۸	۰/۱۵۱۲	۰/۰۶۵۵	سقوط لاستیک	
۷	۰/۱۹۱۴	۰/۰۴۲۲	۰/۱۷۸۱	عبوری آماری	روش های اجرایی
۶	۰/۳۰۱۰	۰/۰۶۱۳	۰/۱۴۲۴	عبوری کنترل شده	
۲	۰/۷۲۰۸	۰/۱۵۲۷	۰/۰۵۹۱	اندازه گیری نزدیک	
۱	۰/۸۲۵۷	۰/۱۶۶۱	۰/۰۳۵۱	تراکم صوت در تخته	

## ۸- نتیجه گیری

تحلیل روش‌های مختلف با استفاده از مدل تاپسیس بیانگر این واقعیت بوده است.

یکی از بهترین روش‌های کاهش آلودگی صوتی حاصل از اندرکنش بین لاستیک با روسازی، کنترل و کاهش آلودگی صوتی ترافیکی در محل تولید نویز است. تحقیقات نشان داده است که روسازی‌ها می‌توانند تا ۱۵ دسی بل، آلودگی صوتی ترافیکی را کاهش داده و در این راستا از آسفالت متخلخل، آسفالت پروالاستیک، آسفالت سنگدانه ای و آسفالت لاستیکی استفاده شده است. همچنین آسفالت پروالاستیک با فضای خالی بالا و مواد لاستیکی، بهترین عملکرد را در راستای کاهش آلودگی صوتی ترافیکی نشان داده است.

## ۹- پیشنهادات

پیشنهادهای ذیل در راستای توسعه و پیشرفت پژوهش‌های آتی توصیه شده است:

- تحقیق‌هایی در زمینه‌ی شبیه‌سازی صوتی روسازی‌های کم صدا انجام و مدل‌های سه بعدی تهیه شوند.
- باید کاهش نویز روسازی‌های کم صدا به صورت دقیق بررسی شده تا روسازی کم صدا بر اساس الزامات منطقه‌ای طراحی گردد.
- از روش‌های کاهش انرژی صوت در راستای کاهش آلودگی صوتی ترافیکی جاده‌های کشور استفاده شود.
- نقشه صوتی برای شهرهای مختلف ایران و دنیا تهیه شود.

## منابع

- [1] V. Nedic, D. Despotovic, S. Cvetanovic, M. Despotovic, S. Babic, Comparison of classical statistical methods and artificial neural network in traffic noise prediction, Environmental Impact Assessment Review, 49 (2014) 24-30.
- [2] H. Wang, Y. Ding, G. Liao, C. Ai, Modeling and optimization of acoustic absorption for porous asphalt concrete, Journal of Engineering Mechanics, 142(4) (2016) 04016002.
- [3] R. Kleizienė, O. Šernas, A. Vaitkus, R. Simanavičienė, Asphalt pavement acoustic performance model, Sustainability, 11(10) (2019) 2938.
- [4] P.R. Donavan, B. Rymer, Assessment of highway

منابع متعدد داخلی از جمله موتور، سیستم مکش، آگزوز و منابع متعدد خارجی از جمله فرآیند پیش رانش، مقاومت آیرودینامیکی و اندرکنش لاستیک با سطح رویه روسازی، در تولید آلودگی صوتی ترافیکی تاثیرگذار است. مطالعات نشان داده است که یکی از مهم‌ترین آلودگی‌های صوتی ترافیکی، از اندرکنش لاستیک با روسازی حاصل شده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در تولید نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در فرکانس‌های مختلف، سرعت وسایل نقلیه است. از مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با لاستیک از جمله تخلخل آج، فرسایش و سختی لاستیک در شدت تولید این آلودگی‌ها تاثیرگذار است. تاثیر عرض لاستیک در تولید آلودگی‌های صوتی ترافیکی حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی در مقایسه با قطر لاستیک، بیشتر است. بافت ماکروتکسچر و مگاتکسچر روسازی با افزایش مقاومت غلظشی چرخها و کاهش کیفیت رانندگی، آلودگی صوتی ناشی از ترافیک را افزایش داده است.

در راستای سنجش آلودگی صوتی ترافیکی از روش‌های آزمایشگاهی و اجرایی استفاده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که روش‌های آزمایشگاهی دقیق‌تر است و نتایج روش‌های اجرایی به واقعیت نزدیک‌تر است. همچنین روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی می‌توانند تاثیر عوامل محیطی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. از مزایای شرایط اندازه‌گیری قابل کنترل، محیط آزمایش تکرارپذیر و نتایج اندازه‌گیری دقیق است. محبوب‌ترین روش آزمایشگاهی در شبیه‌سازی نویز حاصل از اندرکنش لاستیک با روسازی، روش لوله آمپدانس است. دلیل اصلی کاربرد آن، سادگی انجام آزمایش و تشخیص میزان جذب صدای مواد مختلف از جمله رویه‌های روسازی است. مطالعات نشان داد که روش‌های اجرایی، توانایی بالایی در شبیه‌سازی شرایط واقعی داشته و کاربرد آنها مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. اگرچه در روش‌های عبوری، جزئیات بیشتری حاصل شده است اما نسبت به روش‌های اندازه‌گیری نزدیک و تراکم صوت در تخته، بسیار زمان‌بر و پرهزینه‌تر هستند. از مزایای روش اندازه‌گیری نزدیک، قابلیت کنترل و بازرسی فواصل وسیعی از سطح روسازی، محاسبه مقدار میانگین قابل اطمینان و قابلیت شناسایی خرابی‌های روسازی است. همچنین تاثیر عوامل محیطی در نتایج روش تراکم صوت در تخته بسیار کم بوده است. نتایج روش تراکم صوت در تخته نسبت به روش اندازه‌گیری نزدیک، دارای همبستگی بیشتری با نتایج روش‌های عبوری بوده است. در نتیجه روش تراکم صوت در تخته نتایج بهتری از سایر روش‌ها ارائه داده است. همچنین

- Journal of Cleaner Production, 287 (2021) 125056.
- [14] T. Li, A state-of-the-art review of measurement techniques on tire-pavement interaction noise, *Measurement*, 128 (2018) 325-351.
- [15] S. Paje, M. Bueno, F. Terán, U. Viñuela, J. Luong, Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3) (2008) 1439-1445.
- [16] P. Mikhailenko, Z. Piao, M.R. Kakar, M. Bueno, S. Athari, R. Pieren, K. Heutschi, L. Poulidakos, Low-Noise pavement technologies and evaluation techniques: a literature review, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6) (2022) 1911-1934.
- [17] R. Bernhard, R.L. Wayson, J. Haddock, N. Neithalath, A. El-Aassar, J. Olek, T. Pellinen, W.J. Weiss, An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement, *Institute of Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University*, (2005) 26.
- [18] A. Terminology, American national standard, ANSI S1, (2006) 1-1994.
- [19] A.C. Sparavigna, The science of al-Biruni, arXiv preprint arXiv:1312.7288, (2013).
- [20] G. Elert, The Nature of Sound, in: *The Physics Hypertextbook*. physics info Retrieved. (2016) 06-20.
- [21] B. Jakovljevic, K. Paunovic, G. Belojevic, Road-traffic noise and factors influencing noise annoyance in an urban population, *Environment international*, 35(3) (2009) 552-556.
- [22] T.H. Oiamo, G.M. Aasvang, Noise and Health, *International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition)*, Elsevier, (2020) 409-413.
- [23] C. Hurlley, Night noise guidelines for Europe, WHO Regional Office Europe, (2009).
- [24] A. Vaitkus, V. Vorobjovas, A. Jagniatinskis, T. Andriejauskas, B. Fiks, Peculiarity of low noise pavement design under Lithuanian conditions, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(3) (2014) 155-163.
- [25] E. Zofka, A. Zofka, T. Mechowski, Pavement noise measurements in Poland, in: *IOP Conference Series: pavements for tire/road noise generation*, SAE transactions, (2003) 1829-1838.
- [5] M. Harrison, *Vehicle refinement: controlling noise and vibration in road vehicles*, Elsevier, (2004).
- [6] D. Wang, P. Liu, Z. Leng, C. Leng, G. Lu, M. Buch, M. Oeser, Suitability of PoroElastic Road Surface (PERS) for urban roads in cold regions: Mechanical and functional performance assessment, *Journal of cleaner production*, 165 (2017) 1340-1350.
- [7] S. Han, Y. Dong, H. Chen, D. Zhang, X. Lu, Y. Shi, Noise Reduction Performance of Exposed Aggregate Cement concrete Pavement, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5(2) (2005) 32.
- [8] S. Ullrich, Drum Measurements Of Tyre Noise As A Function Of Roadway Temperature And Circumferential Forces, In: *Inter-Noise 93: People Versus Noise*, 1993.
- [9] I.O.f. Standardization, *Acoustics: Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise. Part 1: Statistical Pass-By Method. Partie 1: Méthode Statistique Au Passage*, International Organization for Standardization, 1997.
- [10] V. Khan, K.P. Biligiri, Evolution of tyre/road noise research in India: Investigations using statistical pass-by method and noise trailer, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3) (2018) 253-264.
- [11] G. de León, L.G. Del Pizzo, L. Teti, A. Moro, F. Bianco, L. Fredianelli, G. Licitra, Evaluation of tyre/road noise and texture interaction on rubberised and conventional pavements using CPX and profiling measurements, *Road Materials and Pavement Design*, 21(sup1) (2020) S91-S102.
- [12] R.M. Knabben, G. Triches, E.F. Vergara, S.N. Gerges, W. van Keulen, Characterization of tire-road noise from Brazilian roads using the CPX trailer method, *Applied Acoustics*, 151 (2019) 206-214.
- [13] S. Ling, F. Yu, D. Sun, G. Sun, L. Xu, A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement,



- [37] Z. Zhang, B. Luan, X. Liu, M. Zhang, Effects of surface texture on tire-pavement noise and skid resistance in long freeway tunnels: From field investigation to technical practice, *Applied Acoustics*, 160 (2020) 107120.
- [38] P.W.R. Association, Report of the committee on surface characteristics, in: *Proceeding of XVIII World Road Congress*, (1987), pp. 13-19.
- [39] R. Pelloli, Road surface characteristics and hydroplaning, *Transportation Research Record*, 624 (1977) 27-32.
- [40] T. Li, Influencing parameters on tire-pavement interaction noise: Review, experiments, and design considerations. *Designs*, 2(4) (2018): 38.
- [41] B.M. Luccioni, M. Luege, Concrete pavement slab under blast loads, *International journal of impact engineering*, 32(8) (2006) 1248-1266.
- [42] U. Sandberg, Road surface influence on tire/road noise- Part I Descornet, G., Sandberg, U: Road surface influence on tire/road noise-Part II VTI preprint, 56 (1980).
- [43] M. Sakhaefar, A. Banihashemrad, G. Liao, B. Waller, Tyre-pavement interaction noise levels related to pavement surface characteristics, *Road Materials and Pavement Design*, 19(5) (2018) 1044-1056.
- [44] F. Anfosso-Lédée, M.-T. Do, Geometric descriptors of road surface texture in relation to tire-road noise, *Transportation research record*, 1806(1) (2002) 160-167.
- [45] K. Gee, Surface texture for asphalt and concrete pavements, *FHWA Technical Advisory TA*, 5040 (2005).
- [46] P.R. Donovan, Effect of porous pavement on wayside traffic noise levels, *Transportation Research Record*, 2403(1) (2014) 28-36.
- [47] R.S. McDaniel, K.J. Kowalski, A. Shah, J. Olek, R.J. Bernhard, Long term performance of a porous friction course, (2010).
- [48] H. Bendtsen, Q. Lu, E. Kohler, Acoustic aging of asphalt pavements: A Californian/Danish comparison, (2010).
- [49] M. Gustafsson, C.M. Berglund, B. Forsberg, I. Forsberg, S. Forward, S. Grudemo, U. Hammerström, M. Hjort, T. Jacobson, C. Johansson, Effects of winter tyres: state of the art, *VTI Rapport*, (543) (2006).
- Materials Science and Engineering, IOP Publishing, (2017), pp. 012103.
- [26] T. Li, Literature review of tire-pavement interaction noise and reduction approaches, *Journal of Vibroengineering*, 20(6) (2018) 2424-2452.
- [27] A. Vaitkus, T. Andriejauskas, V. Vorobjovas, A. Jagniatinskis, B. Fiks, E. Zofka, Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction, *Construction and Building Materials*, 152 (2017) 345-356.
- [28] U. Sandberg, J. Ejsmont, Tyre/road noise. Reference book, (2002).
- [29] M.R. Ganji, A. Golroo, H. Sheikhzadeh, A. Ghelmani, M.A. Bidgoli, Dense-graded asphalt pavement macrotexture measurement using tire/road noise monitoring, *Automation in Construction*, 106 (2019) 102887.
- [30] R.O. Rasmussen, R.J. Bernhard, U. Sandberg, E. Mun, The little book of quieter pavements, United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology, 2007.
- [31] P.R. Donovan, Comparative measurements of tire/pavement noise in Europe and the United States, *Noise News International*, 13(2) (2005) 46-53.
- [32] T. Bennert, D. Hanson, A. Maher, N. Vitillo, Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise, *ASTM International*, 2005.
- [33] A. Syamkumar, K. Aditya, V. Chowdary, Development of mode-wise noise prediction models for the noise generated due to tyre-pavement surface interaction, *Advanced Materials Research*, 723 (2013) 50-57.
- [34] T. Fujikawa, H. Koike, Y. Oshino, H. Tachibana, Definition of road roughness parameters for tire vibration noise control, *Applied acoustics*, 66(5) (2005) 501-512.
- [35] J. Winroth, W. Kropp, C. Hoever, T. Beckenbauer, M. Männel, Investigating generation mechanisms of tyre/road noise by speed exponent analysis, *Applied Acoustics*, 115 (2017) 101-108.
- [36] T. Dare, R. McDaniel, A. Shah, Modeling Tire-Pavement Noise Using MnROAD Data, (2015).

- friction, noise and durability, Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways North Central Superpave Center Purdue University, 7 (2014).
- [62] T. Li, J. Feng, R. Burdisso, C. Sandu, Effects of speed on tire–pavement interaction noise (Tread-pattern–related noise and non–tread-pattern–related noise), *Tire Science and Technology*, 46(2) (2018) 54-77.
- [63] T. Dare, R. Bernhard, Accelerometer measurements of tire tread vibrations and implications to wheel-slap noise, *Tire Science and Technology*, 41(2) (2013) 109-126.
- [64] J. Ejsmont, S. Taryma, Halas Opon Samochodow Osobowych Poruszajacych Sie Posuchych Nawierzchniach asfaltowych I Betonowych, Technical University of Gdansk, Gdansk, Poland, (1982).
- [65] G. Tong, Q. Wang, K. Yang, X.C. Wang, An experiment investigation to the radial tire noise, *Advanced Materials Research*, 694 (2013) 361-365.
- [66] U. Sandberg, J.A. Ejsmont, Three basic methods for measurement of tire/road noise, in, *Statens Väg-och Trafikinstitut., VTI särtryck 99*, 1984.
- [67] S. Kocak, M.E. Kutay, Relationship between material characteristics of asphalt mixtures and highway noise, *Transportation research record*, 2295(1) (2012) 35-43.
- [68] G. Tong, Q. Wang, K. Yang, L. Wang, Simulation on the radial tire wear noise, *Applied Mechanics and Materials*, 488 (2014) 1121-1124.
- [69] K. Glaeser, Road surface characteristics and type road noise, Federal Highway Research Institute BAST, (2007).
- [70] R.J. Bernhard, R.S. McDaniel, Basics of noise generation for pavement engineers, *Transportation research record*, 1941(1) (2005) 161-166.
- [71] D. Wang, A. Schacht, Z. Leng, C. Leng, J. Kollmann, M. Oeser, Effects of material composition on mechanical and acoustic performance of poroelastic road surface (PERS), *Construction and Building Materials*, 135 (2017) 352-360.
- [72] C. Leng, G. Lu, J. Gao, P. Liu, X. Xie, D. Wang, Sustainable green pavement using bio-based polyurethane
- [50] J.S. Yang, T.F. Fwa, G.P. Ong, C.H. Chew, Finite-element analysis of effect of wide-base tire on tire-pavement noise, *Advanced Materials Research*, 723 (2013) 105-112.
- [51] U. Sandberg, J. Ejsmont, Influence of tyre tread rubber hardness on tyre/road noise emission, *Inter-Noise*, Istanbul, Turkey, (2007).
- [52] D. Rochoux, F. Biesse, Tire/road noise, the tire vibration as the main noise source from road texture, in: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering, 2010, pp. 7199-7208.
- [53] J. Walker, Noise from the Tyre-Road Interface with Heavy Commercial Vehicles, *Transport Engineer*, (68) (1975).
- [54] W. Flanagan, Recent studies give unified picture of tire noise, *Automotive Engineering*, 80(4) (1972).
- [55] R.K. Hillquist, P.C. Carpenter, A basic study of automobile tire noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(1\_Supplement) (1973) 331-331.
- [56] W.A. Leasure Jr, E.K. Bender, Tire–road interaction noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(1) (1975) 39-50.
- [57] M. Bueno, J. Luong, U. Viñuela, F. Terán, S. Paje, Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise, *Applied Acoustics*, 72(11) (2011) 829-835.
- [58] U. Sandberg, Semi-generic temperature corrections for tyre/road noise, in: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering, 2004, pp. 3302-3309.
- [59] S. Konishi, T. Fujino, N. Tomita, M. Sakamoto, Temperature effect on tire/road noise, *JSAE Review*, 1(16) (1995) 113.
- [60] G. Liao, M. Heitzman, R. West, S. Wang, C. Ai, Temperature effects on the correlations between tire-pavement noises and pavement surface characteristics, in: *New Frontiers in Road and Airport Engineering*, 2015, pp. 219-232.
- [61] R. McDaniel, A. Shah, T. Dare, R. Bernhard, Hot mix asphalt surface characteristics related to ride, texture,

- Association of State and Highway Transportation Officials, (2010).
- [84] R. Rasmussen, R. Sohaney, P. Wiegand, Measuring and reporting tire-pavement noise using on-board sound intensity (OBSI), National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, Iowa. (2011).
- [85] T. Park, M. Kim, C. Jang, T. Choung, K.-A. Sim, D. Seo, S.I. Chang, The public health impact of road-traffic noise in a highly-populated city, Republic of Korea: Annoyance and sleep disturbance, *Sustainability*, 10(8) (2018) 2947.
- [86] R. Kim, Burden of disease from environmental noise, in: WHO International Workshop on Combined Environmental Exposure: Noise, Air Pollutants and Chemicals. Ispra, 2007.
- [87] F.G. Praticò, F. Anfosso-Lédée, Trends and issues in mitigating traffic noise through quiet pavements, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53 (2012) 203-212.
- [88] D.E. Mogrovejo, G.W. Flintsch, E.D. de León Izeppi, K.K. McGhee, R.A. Burdisso, Short-Term effect of pavement surface aging on tire-pavement noise measured with Onboard sound Intensity Methodology, *Transportation Research Record*, 2403(1) (2014) 17-27.
- [89] E. Saemann, G. Dimitri, P. Kindt, Tire requirements for pavement surface characteristics, in: 7th symposium on pavement surface characteristics: SURF, 2012, pp. 1-33.
- [90] M. Haider, M. Conter, R. Wehr, U. Sandberg, F. Anfosso-Lédée, Project ROSANNE: rolling resistance, skid resistance, and noise emission measurement standards for road surfaces, in: *Internoise 2014*, 2014, pp. 6p.
- [91] M. Liu, X. Huang, G. Xue, Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1) (2016) 183-196.
- [92] B. Yu, L. Jiao, F. Ni, J. Yang, Long-term field performance of porous asphalt pavement in China, *Road Materials and Pavement Design*, 16(1) (2015) 214-226.
- [93] M.-L. Zeng, L.-Q. Peng, C.-F. Wu, B.-Y. Tan, binder in tunnel, *Materials*, 12(12) (2019) 1990.
- [73] S. Alber, W. Ressel, P. Liu, D. Wang, M. Oeser, Influence of soiling phenomena on air-void microstructure and acoustic performance of porous asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 938-948.
- [74] L. Chu, T. Fwa, K. Tan, Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 402-409.
- [75] R.M. Knabben, G. Trichês, S.N. Gerges, E.F. Vergara, Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures, *Applied Acoustics*, 114 (2016) 266-274.
- [76] M. Möser, *Technische Akustik*, Springer, 2005.
- [77] M. Wolkesson, Evaluation of impedance tube methods-A two microphone in-situ method for road surfaces and the three microphone transfer function method for porous materials, (2012).
- [78] M. Haider, M. Conter, Austrian experience with the backing board method for statistical pass-by measurements, in: *Proc. of acoustics*, 2008.
- [79] D.M. Gonzalez, J.M.B. Morillas, G.R. Gozalo, Acoustic behaviour of plates made of different materials for measurements with the microphone flush mounted, *Applied Acoustics*, 132 (2018) 135-141.
- [80] G.H. Wang, R. Shores, J. Botts, R. Hibbett, On-board sound intensity tire-pavement noise study in North Carolina, North Carolina. Dept. of Transportation. Research and Analysis Group, 2011.
- [81] C. Vuye, A. Bergiers, B. Vanhooreweder, The acoustical durability of thin noise reducing asphalt layers, *Coatings*, 6(2) (2016) 21.
- [82] M. Bueno, J. Luong, F. Terán, U. Viñuela, S. Paje, Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement, *International Journal of Pavement Engineering*, 15(7) (2014) 606-613.
- [83] T. AASHTO, 76-12. Standard method of test for measurement of tire/pavement noise using the on-board sound intensity (OBSI) method, USA: American

- reducing and early life skid resistance properties, in: Proceedings of ACOUSTICS, 2006, pp. 319-323.
- [104] J. Chandler, S. Phillips, P. Roe, H. Viner, Quieter concrete roads: construction, texture, skid resistance and noise, TRL REPORT TRL 576, (2003).
- [105] V. Vázquez, F. Terán, P. Huertas, S. Paje, Field assessment of a Cold-In place-recycled pavement: Influence on rolling noise, Journal of Cleaner Production, 197 (2018) 154-162.
- [106] W. Gardziejczyk, A. Plewa, R. Pakholak, Effect of addition of rubber granulate and type of modified binder on the viscoelastic properties of stone mastic asphalt reducing tire/road noise (SMA LA), Materials, 13(16) (2020) 3446.
- [107] G. Licitra, A. Moro, L. Teti, L. Del Pizzo, F. Bianco, Modelling of acoustic ageing of rubberized pavements, Applied Acoustics, 146 (2019) 237-245.
- [108] F. Kehagia, S. Mavridou, Noise reduction in pavement made of rubberized bituminous top layer, Open Journal of Civil Engineering, 2014 (2014).
- [109] M.J. Brennan\*, A.M. Kavanagh, J.N. Sheahan, Case studies of a low-noise road surface, International Journal of Pavement Engineering, 2(2) (2001) 121-134.
- [110] M. Gao, Study on Noise Reduction Characteristics of Continuous Gradation Rubber Particles Asphalt Pavement, Doctoral dissertation, Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [111] V. Najafi Moghaddam Gilani, M. Habibzadeh, S.M. Hosseinian, R. Salehfard, A review of railway track laboratory tests with various scales for better decision-making about more efficient apparatus using TOPSIS analysis, Advances in Civil Engineering, 2022 (2022).
- [112] H. Ziari, A. Amini, A. Saadatjoo, S.M. Hosseini, V.N.M. Gilani, A prioritization model for the immunization of accident prone using multi-criteria decision methods and fuzzy hierarchy algorithm, Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE), 3(3) (2017).
- Experimental study of the performance of ultrathin asphalt friction course, Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Journal of Wuhan University of Technology), 34(4) (2012) 27-31.
- [94] J.T. Guo, R. Zhang, R. Wang, Experimental research on sound absorption performance of low-noise pavement, Advanced Materials Research, 374 (2012) 1400-1404.
- [95] M. Li, W. van Keulen, H. Ceylan, G. Tang, M. van de Ven, A. Molenaar, Influence of road surface characteristics on tire-road noise for thin-layer surfacings, Journal of Transportation Engineering, 141(11) (2015) 04015024.
- [96] S. Luo, Q. Lu, Z. Qian, Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete, Construction and Building Materials, 76 (2015) 97-102.
- [97] J. Ejsmont, L. Goubert, G. Ronowski, B. Świczko-Żurek, Ultra low noise poroelastic road surfaces. Coatings 6 (2): 18, in, (2016).
- [98] S. Meiarashi, Poroelastic road surface as an ultimate highway noise measure, in: The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association (PIARC), (2003).
- [99] U. Sandberg, L. Goubert, Persuade: a European project for exceptional noise reduction by means of poroelastic road surfaces, in: 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2011 (INTER-NOISE 2011), Institute of Noise Control Engineering of Japan (INCE/J), Acoustical Society ..., 2011, pp. 673-684.
- [100] K.P. Biligiri, B. Kalman, A. Samuelsson, Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces, International Journal of Pavement Engineering, 14(1) (2013) 12-23.
- [101] B. Świczko-Żurek, J. Ejsmont, G. Motrycz, P. Stryjek, Risks related to car fire on innovative Poroelastic Road Surfaces—PERS, Fire and Materials, 39(2) (2015) 95-108.
- [102] V.F. Vázquez, F. Terán, J. Luong, S.E. Paje, Functional performance of stone mastic asphalt pavements in Spain: Acoustic assessment, Coatings, 9(2) (2019) 123.
- [103] G. Greer, Stone Mastic Asphalt—A review of its noise

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*D. Sadat Sheikholeslami, R. Tanzadeh , F. Moghadas Nejad , Investigation of laboratory and Field methods of measuring energy caused by traffic noise pollution, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1701-1730.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2023.21349.7692](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21349.7692)



