

بررسی ضریب جذب صوت مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک فرآوری شده تحت تاثیر عوامل جوی

پرنیان منکچیان*، امیر کاووسی

۱ ایران، تهران، بزرگراه جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست، ۱۱۱-۱۴۱۱۵، دانشجوی کارشناسی ارشد.

۲ ایران، تهران، بزرگراه جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست، ۱۱۱-۱۴۱۱۵، استاد.

*p.monokchian@modares.ac.ir

چکیده

حمل و نقل یکی از منابع مهم ایجاد آلودگی صوتی است که با توسعه‌ی جاده‌ها، سلامت انسان‌ها و همچنین اکوسیستم‌های طبیعی را به خطر انداخته است. از این جهت، طرح روسازی‌های مبتنی بر کاهش آلودگی صوتی راه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از انواع مختلف روسازی‌های مبتنی بر کاهش آلودگی صوتی، مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک و همچنین نوع جدیدتر آنها با عنوان خرده لاستیک فرآوری شده می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی ضریب جذب صوت نمونه‌های شاهد، حاوی خرده لاستیک و مقادیر متفاوت خرده لاستیک فرآوری شده پس از ساخت و همچنین پس از شبیه‌سازی شرایط جوی جهت بررسی دوام ویژگی‌های صوتی آنها می‌باشد. خرده لاستیک و خرده لاستیک فرآوری شده سبب افزایش ضریب جذب صوت نمونه‌ها شده است. با اعمال شرایط دمایی بالا و رطوبت نیز، ضریب جذب صوت تمامی نمونه‌ها افزایش یافته است و می‌توان گفت سیکل‌های یخ و ذوب نیز به طور کلی سبب افزایش ضریب جذب صوت می‌گردند.

کلمات کلیدی: ضریب جذب صوت؛ پودر لاستیک؛ شرایط جوی.

۱- مقدمه

آلودگی مهم‌ترین عامل بیماری و مرگ در جهان امروز به شمار می‌آید [۱]. در میان انواع آلودگی، پس از آلودگی هوا، آلودگی صوتی بیشترین آسیب را به سلامت انسان وارد می‌کند و می‌تواند منجر به بیماری‌هایی نظیر ناشنوایی، بی‌خوابی، عدم تمرکز، مشکلات قلبی و عروقی، افزایش فشارخون، افزایش اضطراب و اختلالات عصبی گردد [۲]. مطابق گزارش سازمان جهانی بهداشت، سالانه ۱.۶ میلیون سال از زندگی سالم جمعیت اروپا، به دلیل آلودگی صوتی ناشی از حمل و نقل کاسته می‌شود [۱]. شایان ذکر است که مضرات ناشی از آلودگی صوتی تنها مختص بشر نیست و بر اکوسیستم‌های طبیعی نیز به طور چشمگیری تاثیرگذار است. تحقیقات نشان می‌دهند که این نوع آلودگی می‌تواند منجر به مهاجرت، بیماری و تغییر در ساختار سنی و عمر برخی گونه‌های جانوری شود [۳].

یکی از مهم‌ترین منابع ایجاد آلودگی صوتی در راه‌ها، تماس تایر وسایل نقلیه با سطح روسازی است که علاوه بر سرعت وسایل نقلیه، به ویژگی‌های روسازی و تایر نیز وابسته است. در سرعت‌های کمتر از ۳۰ کیلومتر بر ساعت برای خودروهای سواری و کمتر از ۷۵ کیلومتر بر ساعت برای وسایل نقلیه سنگین، صدای موتور وسایل نقلیه غالب است در حالی که در سرعت‌های بالاتر، صدای ناشی از تماس چرخ وسایل نقلیه و روسازی غالب خواهد شد [۴]. صدای ناشی از موتور و چرخ با پیشرفت در ساخت وسایل نقلیه موتوری در سال‌های اخیر، کاهش چشمگیری داشته است و امروزه در کاهش آلودگی صوتی جاده‌ها، توجه بیشتری به صدای ناشی از تماس چرخ وسایل نقلیه و سطح روسازی صورت می‌گیرد [۵]. در این راستا، امروزه انواع رویه‌های آسفالتی کم‌صدا مورد توجه و پژوهش قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، با افزایش تقاضای حمل و نقل در سراسر جهان، یکی از چالش‌ها در ساخت روسازی، کمبود مصالح موجود در طرح اختلاط آسفالت است. در این خصوص، استفاده از مصالحی که به عنوان پسماند شناخته می‌شوند، در طرح اختلاط مخلوط آسفالتی به عنوان جایگزین توانسته است در راستای توسعه‌ی پایدار راهگشا باشد [۶].

خرده‌لاستیک حاصل از تایرهای کهنه و بلااستفاده، می‌تواند به گونه‌های متفاوتی مورد استفاده مجدد قرار گیرد. در صنعت راهسازی نیز استفاده از خرده لاستیک، در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته‌است. استفاده از خرده لاستیک در روسازی می‌تواند ویژگی‌های روسازی را بهبود بخشد و همچنین با کاهش استفاده از منابع و مصالح جدید، گامی در راستای توسعه‌ی پایدار و همچنین راهکاری مناسب جهت دفع پسماند ناشی از تایر وسایل نقلیه محسوب می‌گردد [۷]. افزایش مقاومت مارشال، افزایش مقاومت کششی، کاهش شیارشدگی، افزایش مدول کشسانی، کاهش حساسیت رطوبتی و بهبود عملکرد و کاهش خرابی آسفالت در دماهای بالا و پایین بخشی از مزایای مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک نسبت به نمونه‌های رایج فاقد آن به شمار می‌آید [۹][۸]. جهت اضافه نمودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالتی دو روش متفاوت وجود دارد: روش خشک و روش تر. در روش خشک، CR^۱ جایگزین بخشی از سنگدانه‌های موجود در طرح اختلاط می‌گردد در حالی که در روش تر، قیر و پودر لاستیک در دما و سرعت بالا با یکدیگر مخلوط می‌شوند. علی‌رغم مزایای عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی خرده لاستیک اضافه شده به روش تر، این روش دارای معایبی نظیر نیاز به تجهیزات خاص و صرف انرژی و هزینه بالا جهت اختلاط و غیره است [۱۰]. در این راستا فرآیند تولید نوینی برای آن ابداع شده است. در این روش از نوعی افزودنی الاستومری فعال استفاده می‌گردد تا پودر لاستیک فرآوری گردد. پودر لاستیک فرآوری شده (RAR^۲) شامل پودر لاستیک، قیر و مواد معدنی می‌باشد. [۱۱]

نتایج پژوهش‌های بسیاری مبتنی بر کاهش آلودگی صوتی مربوط به مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک می‌باشد. مطابق نتایج پژوهش [۱۲] که در سال ۲۰۱۰ با انجام آزمایش ارزیابی میدانی صوت به روش محدوده نزدیک^۳ برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک و فاقد آن صورت پذیرفته است، استفاده از خرده لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی به روش خشک می‌تواند سطح فشار صوت را به میزان ۲ دسی‌بل کاهش دهد در حالی که این میزان در صورت استفاده از روش تر به میزان ۰٫۵ دسی‌بل خواهد بود. همچنین نتایج پژوهش‌های [۱۳] و [۱۴] که به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ به روش‌های مشابه انجام شده‌اند، نشان می‌دهد، وجود خرده لاستیک در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند آلودگی صوتی مربوط به آنها را به میزان ۲ الی ۳ دسی‌بل کاهش دهد.

در خصوص ضریب جذب صوت، نتایج برخی پژوهش‌ها مبنی بر افزایش ضریب جذب صوت با افزودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالتی می‌باشد [۱۶][۱۵]، در حالی که در برخی دیگر ضریب جذب صوت در صورت افزودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالتی تغییر قابل توجهی نداشته است [۱۷][۱۳].

از سوی دیگر طراحی مخلوط آسفالتی بهینه جهت کاهش آلودگی صوتی راه وابسته به شرایط منطقه اعم از میزان بار ترافیکی، اقلیم و شرایط آب و هوایی می‌باشد. طراحی رویه‌های آسفالتی کم‌صدا در مناطقی که دارای نوسان دمایی قابل توجه در طول سال

^۱ Crumb Rubber

^۲ Reacted and Activated Rubber

^۳ Close Proximity Method (CPX): بر اساس استاندارد ISO 11819-2 با هدف ارزیابی آلودگی صوتی راه ناشی از تماس تایر وسیله نقلیه با سطح روسازی به صورت میدانی انجام می‌گیرد.

هستند و سیکل‌های ذوب و یخ مکرری برای روسازی در آنها رخ می‌دهد، به مراتب پیچیده‌تر و نیازمند بررسی‌های گسترده‌تری خواهد بود. [۱۸]

نتایج پژوهش [۷] که در سال ۲۰۱۶ صورت پذیرفته است، نشان می‌دهد، سطح فشار صوت تولیدی در اثر تماس تایر وسیله نقلیه با سطح روسازی برای مخلوط آسفالتی حاوی خرده لاستیک به میزان ۱,۸ دسی‌بل کمتر از مخلوط‌های آسفالتی رایج است که پس از گذشت سه سال از عمر بهره‌برداری این میزان به ۱,۳ دسی‌بل کاهش می‌یابد. ضریب جذب صوت نمونه‌ها نیز پس از سه سال در بازه فرکانس ۲۰۰ الی ۵۰۰ هرتز برای هر دو نمونه دارا و فاقد خرده لاستیک در مقایسه با زمان اجرای آسفالت کاهش یافته اما در فرکانس‌های بالاتر افزایش یافته است. در پژوهش [۱۹] که در سال ۲۰۱۹ صورت گرفته است، مدلی جهت پیش‌بینی سطح فشار صوت ناشی از تماس تایر وسیله نقلیه و روسازی با توجه به پارامترهای عمر روسازی و شرایط آب و هوایی ارائه شده است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد با گذشت عمر روسازی، آلودگی صوتی ناشی از آن همواره افزایش می‌یابد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی ضریب جذب صوت نمونه‌های حاوی خرده لاستیک فرآوری شده (به روش خشک) در مقایسه با نمونه‌های حاوی خرده لاستیک و فاقد آن به عنوان نمونه شاهد بلافاصله پس از ساخت و همچنین پس از شبیه‌سازی شرایط جوی جهت بررسی دوام ویژگی‌های صوتی آنها می‌باشد.

۲- مواد و مصالح

۲-۱ سنگدانه

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مهندسی راه و ساختمان آبرود شمال، واقع در استان گیلان تهیه شده است که مشخصات آن به شرح جداول ۱ و ۲ می‌باشد و با مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) [۲۰] همخوانی دارد.

جدول ۱. مشخصات سنگدانه‌های درشت آسفالت

نتایج آزمایش	مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴		روش آزمایش	نام آزمایش
	حداکثر	حداقل		
۱۶	۲۵	-	AASHTO-T96	افت وزنی در اثر سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)
۹۰	-	۸۰	ASTMD5821	شکستگی مصالح سنگی (درصد)
۲,۹	۱۵	-	ASTM-D4791	حداکثر درصد سنگدانه‌های پهن و دراز (درصد)
۰,۸	۸	-	AASHTO-T104	افت وزنی با سولفات سدیم (درصد)

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌های ریز آسفالت

نتایج آزمایش	مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴		روش آزمایش	نام آزمایش
	حداکثر	حداقل		
N.P	N.P	N.P	AASHTO-T90	دامنه خمیری (درصد)

افت وزنی با سولفات سدیم (درصد)	AASHTO-T104	-	۱۲	۱,۶
ارزش ماسه‌ای (درصد)	AASHTO-T176	۵۰	-	۷۶

دانه‌بندی مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش مطابق دانه‌بندی پیوسته مخلوط‌های آسفالتی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ می‌باشد.

۲-۲ قیر

قیر مورد استفاده در این پژوهش با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ از شرکت پاسارگاد تهران تهیه شده است که مشخصات آن به شرح جدول ۳ می‌باشد و با مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴ همخوانی دارد.

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

نام آزمایش	روش آزمایش	مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش
		حداقل	حداکثر	
درجه نفوذ (۰/۱۰ میلی‌متر)	ASTM-D5	۶۰	۷۰	۶۵
وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM-D70	-	-	۱,۰۲
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	ASTM-D36	۴۹	۵۶	۵۰,۸
قابلیت کشسانی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌متر)	ASTM-D113	۱۰۰	-	+۱۰۰
نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	AASHTO-D92	۲۳۲	-	۳۰۶

۲-۳ پودر لاستیک فرآوری شده

در این پژوهش از پودر لاستیک با اندازه عبوری از الک #۴۰ و مانده روی الک #۵۰ شرکت یزدتایر و به روش خردکردن در دمای محیط استفاده شده است. پودر لاستیک فرآوری شده مورد استفاده در این آزمایش ترکیبی از ۲۰٪ قیر با درجه نفوذ ۲۰۰/۳۰۰، ۶۰٪ پودر لاستیک، ۱۸٪ AMBS^۴ و ۲٪ آهک هیدراته می‌باشد و AMBS مورد استفاده، ساخت دانشکده شیمی دانشگاه تربیت مدرس است.

ابتدا پودر لاستیک و قیر روان را به مدت ۳ الی ۵ دقیقه با استفاده از یک مخلوط‌کن معمولی بر روی یک گرمکن در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس پودر AMBS طی دو مرحله اضافه شده و با مواد مخلوط می‌گردد. برای جلوگیری از چسبندگی مواد لاستیکی، فرآیند مخلوط کردن باید با سرعت انجام گیرد. شایان ذکر است در اتمام کار، قدری از ماده AMBS بر روی مخلوط ریخته شده و با آن ترکیب می‌گردد.

^۴ Activated Mineral Binder Stabilizer

۳- روش پژوهش

در این بخش، روش ساخت نمونه‌ها، شبیه‌سازی شرایط جوی و همچنین انجام آزمایش تعیین ضریب جذب صوت نمونه‌ها تشریح می‌گردد.

۳-۱ ساخت نمونه

در این آزمایش ۵ نوع نمونه به ابعاد $۷*۱۰*۵۰$ سانتی‌متر و به صورت شاهد، حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک معمولی و حاوی ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده ساخته شدند. ساخت نمونه‌ها در تمامی موارد مطابق استاندارد ASTM-D۶۹۲۶-۱۰ [۲۱] می‌باشد و تنها تراکم آن با استفاده از پیکور صورت پذیرفته است. در تمامی نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و پودر لاستیک فرآوری شده، این افزودنی به روش خشک به کار گرفته شده است و جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مانده روی الک #۵۰ شده است. درصد قیر بهینه برای هر یک از نمونه‌ها مطابق جدول ۴ می‌باشد. جهت انجام آزمایش ضریب جذب صوت از نمونه‌های ساخته شده به قطر ۱۰ سانتی‌متر گر گرفته شده است (مطابق شکل ۱).

جدول ۴. درصد قیر بهینه برای نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه	شاهد	۲۰٪ پودر لاستیک	۲۰٪ RAR	۲۵٪ RAR	۳۰٪ RAR
درصد قیر بهینه	۵/۸	۵/۸۵	۵/۶	۵/۷۲	۵/۸



شکل ۱- نمونه‌های گر گرفته شده جهت آزمایش ضریب جذب صوت

۳-۲ شبیه‌سازی شرایط جوی

در این پژوهش سه نوع شرایط جوی جهت بررسی دوام عملکرد صوتی نمونه‌های آسفالتی (جذب صوت) روی نمونه‌ها شبیه‌سازی شده است. موارد شبیه‌سازی شامل دمای بالا، رطوبت و سیکل ذوب و یخ می‌باشد. جهت شبیه‌سازی شرایط دمای بالا، نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در حمام مارشال با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، قرار داده شده‌اند. به منظور شبیه‌سازی شرایط بارش و اعمال رطوبت، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شده‌اند. همچنین سیکل ذوب و یخ، دو مرتبه مطابق استاندارد AASHTO-T۲۸۳-۲۱ [۲۲] صورت پذیرفته است و پس از هر سیکل آزمایش ضریب جذب صوت تکرار شده است.

۳-۳ آزمایش تعیین ضریب جذب صوت

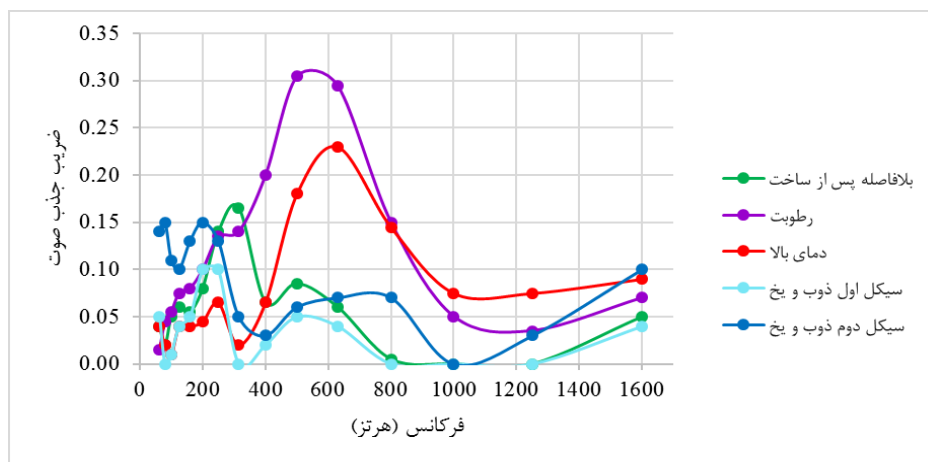
تعیین ضریب جذب صوت هر نمونه مطابق استاندارد ISO ۱۰۵۳۴-۲ [۲۳] با استفاده از لوله امیدانس در بازه فرکانس ۶۳ الی ۱۶۰۰ هرتز انجام گرفته است. از هر طرح اختلاط و شرایط شبیه‌سازی شده، ۲ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش هر نمونه ۳ مرتبه تکرار شده و نتیجه نهایی از میانگین‌گیری حاصل شده است. شایان ذکر است، جهت پر کردن فضای خالی ۲ میلی‌متری میان نمونه و دیواره لوله امیدانس از چسب پلاستیکی استفاده شده است.



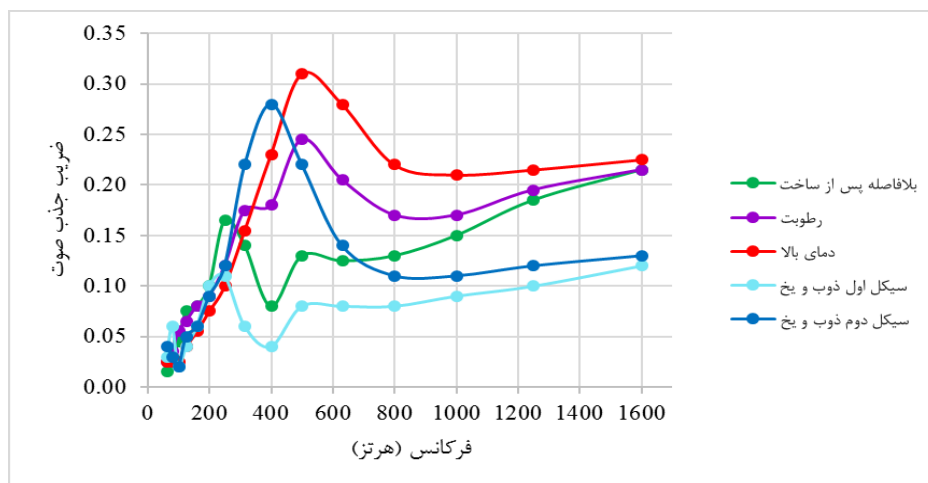
شکل ۲- آزمایش تعیین ضریب جذب صوت با استفاده از لوله امیدانس

۴- نتایج

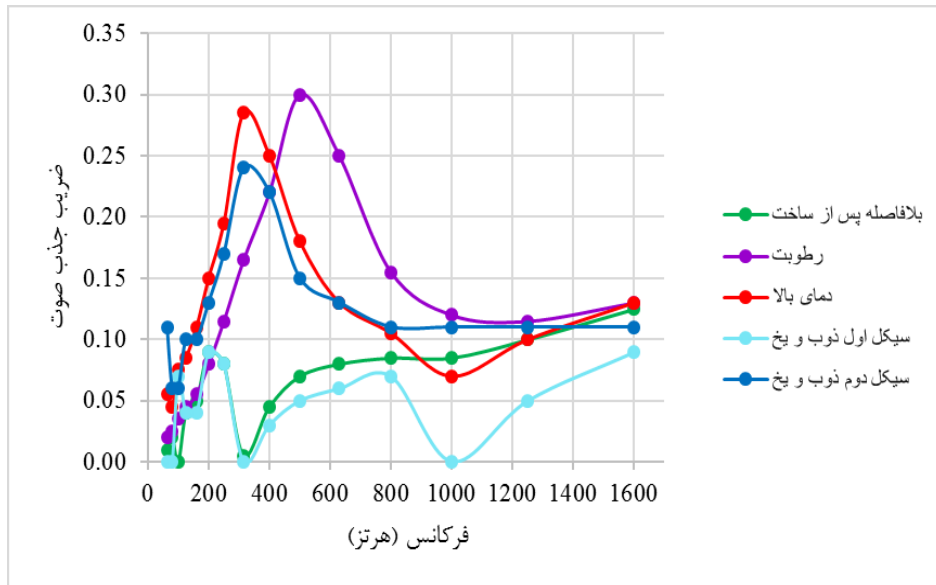
نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین ضریب جذب صوت در شکل‌های ۳ تا ۷ ارائه شده است.



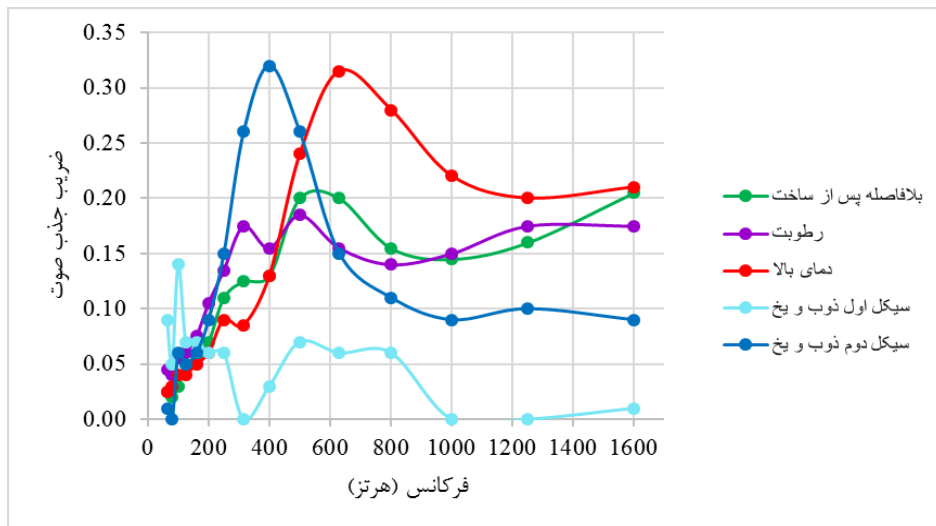
شکل ۳- نتایج آزمایش تعیین ضریب جذب صوت نمونه شاهد



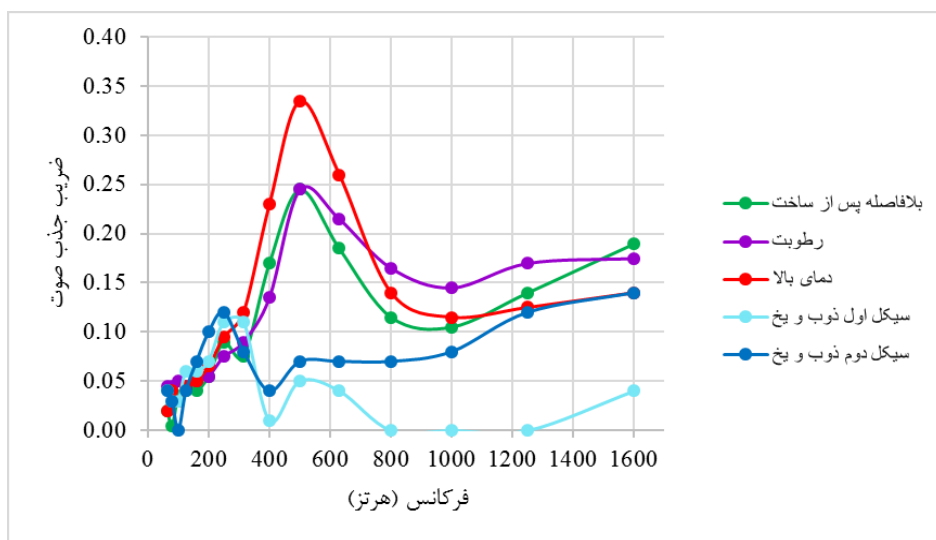
شکل ۴- نتایج آزمایش تعیین ضریب جذب صوت نمونه حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک



شکل ۵- نتایج آزمایش تعیین ضریب جذب صوت نمونه حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده



شکل ۶- نتایج آزمایش تعیین ضریب جذب صوت نمونه حاوی ۲۵٪ پودر لاستیک فرآوری شده



شکل ۷- نتایج آزمایش تعیین ضریب جذب صوت نمونه حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده

همانطور که در شکل‌های ۳ تا ۷ قابل مشاهده است، در تمامی نمونه‌ها، به طور میانگین در بازه فرکانس مورد بررسی در این پژوهش (۶۳ الی ۱۶۰۰ هرتز) دمای بالا و رطوبت سبب افزایش ضریب جذب صوت شده است. از سوی دیگر در تمامی نمونه‌ها در سیکل اول ذوب و یخ، به طور میانگین در فرکانس مورد بررسی در این پژوهش ضریب جذب صوت کاهش یافته است اما سیکل دوم ذوب و یخ در تمامی نمونه‌ها به جز نمونه‌ی حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده، سبب افزایش ضریب جذب صوت شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در ضریب جذب صوت نمونه‌ها، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی می‌باشد که نتایج مربوطه در حالت شاهد و همچنین پس از اعمال شرایط شبیه‌سازی شده جوی در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول ۵ پس از اعمال شرایط دمای بالا، درصد فضای خالی مخلوط افزایش یافته است که سبب افزایش ضریب جذب صوت مخلوط آسفالتی شده است. شایان ذکر است، افزایش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی در نتیجه اعمال دمای بالا با نتایج پژوهش [۲۴] نیز همخوانی دارد.

مطابق درصد فضای خالی به دست آمده برای نمونه‌ها پس از اعمال شرایط رطوبت مدنظر در این پژوهش، تغییر قابل توجهی در درصد فضای خالی نمونه‌ها حاصل نشده است اما از سوی دیگر مطابق نتایج پژوهش‌های [۲۵] و [۲۶] رطوبت می‌تواند، با از بین بردن چسبندگی میان سنگدانه‌ها و قیر موجب افزایش زبری سطح گردد. افزایش زبری سطح نیز مطابق پژوهش‌های پیشین صورت گرفته نظیر [۲۷] و [۲۸] عامل افزایش ضریب جذب صوت می‌باشد.

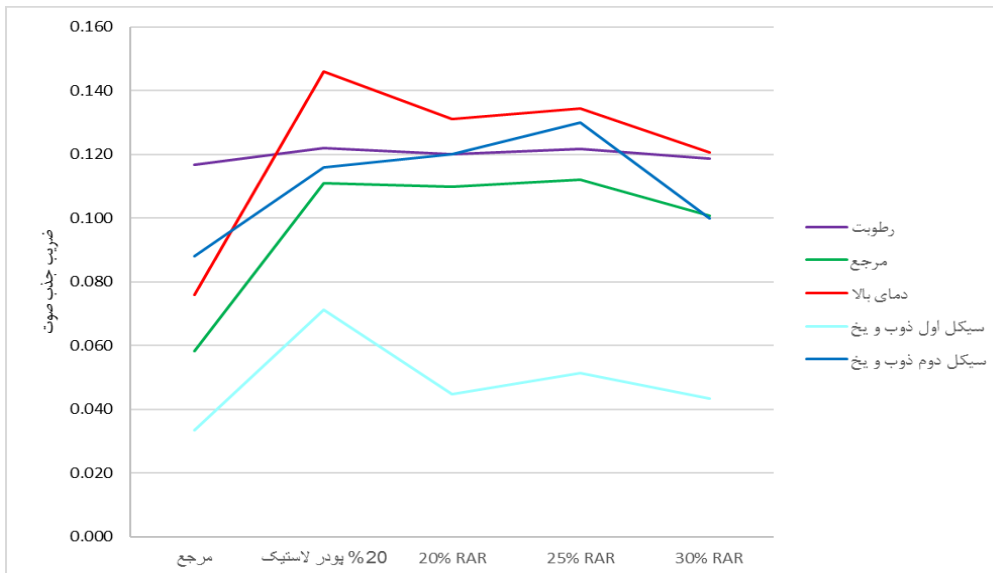
با توجه به جدول ۵، درصد فضای خالی نمونه‌ها پس از سیکل‌های اول و دوم ذوب و یخ، نسبت به حالت بلافاصله پس از ساخت، کاهش یافته است. علی‌رغم افزایش درصد فضای خالی با اعمال سیکل‌های ذوب و یخ در بسیاری از پژوهش‌ها نظیر [۲۹]، نتایج پژوهش [۳۰]، نشان می‌دهد در سیکل‌های ذوب و یخ ابتدایی، پر شدن فضاها خالی که به فضای خارج از نمونه راه ندارند (فضای خالی غیرمتصل) از آب سبب می‌گردد بدون تغییر حجم در نمونه، جرم آن افزایش یابد. این مسئله می‌تواند موجب کاهش درصد فضای خالی آسفالت در سیکل‌های ابتدایی ذوب و یخ شده و در نتیجه آن سبب کاهش ضریب جذب صوت گردد. از این رو در سیکل اول ذوب و یخ در تمامی نمونه‌ها، ضریب جذب صوت کاهش یافته است. پس از سیکل دوم نیز با توجه به کمتر بودن فضای خالی نمونه نسبت پیش از اعمال سیکل‌ها انتظار می‌رفت که ضریب جذب صوت نمونه‌ها کمتر از حالت بلافاصله پس از ساخت باشد؛ لذا به نظر می‌رسد عامل دیگری نظیر زبری سطح پس از اعمال سیکل ذوب و یخ موجب افزایش ضریب جذب صوت شده باشد. مطابق نتایج پژوهش [۳۱]، سیکل ذوب و یخ موجب افزایش زبری سطح می‌گردد و پیرو توضیحاتی که پیش‌تر ارائه شد، افزایش زبری سطح موجب افزایش ضریب جذب صوت در نمونه‌ها شده است. به عبارت دیگر، در سیکل‌های اول و دوم ذوب و یخ از سویی کاهش درصد فضای خالی سبب کاهش ضریب جذب صوت و از سوی دیگر افزایش زبری سطح سبب افزایش ضریب جذب صوت می‌گردد که مطابق نتایج حاصله، در سیکل اول، تاثیر کاهش درصد فضای خالی غالب بوده اما در سیکل دوم به جز نمونه‌ی حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده، تاثیر افزایش زبری سطح غالب شده است. منطقی به نظر می‌رسد که در نمونه‌ی حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده، به دلیل انسجام بیشتر نمونه و چسبندگی بهتر میان سنگدانه‌ها و قیر، زبری کمتری در سطح حاصل شده و در نتیجه آن، ضریب جذب صوت افزایش نیافته باشد.

جدول ۵. درصد فضای خالی نمونه‌های مورد آزمایش

شاهد	۲۰٪ پودر لاستیک	۲۰٪ RAR	۲۵٪ RAR	۳۰٪ RAR
پیش از اعمال شرایط جوی	۴،۵٪	۴،۶٪	۴،۷٪	۴،۷٪
دمای بالا	۶،۹٪	۶،۹٪	۶،۶٪	۶،۸٪
رطوبت	۴،۷٪	۴،۶٪	۵،۰٪	۴،۸٪
سیکل اول ذوب و یخ	۴،۰٪	۳،۸٪	۴،۱٪	۳،۶٪
سیکل دوم ذوب و یخ	۴،۱٪	۴،۰٪	۴،۰٪	۴،۰٪

در شکل ۸ میانگین ضریب جذب صوت در بازه فرکانس مورد بررسی در این پژوهش در هر حالت ارائه شده است.

همانطور که قابل ملاحظه است، در حالت پیش از شبیه‌سازی شرایط جوی و همچنین پس از آن، ضریب جذب صوت نمونه‌ی شاهد از ضریب جذب صوت نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و همچنین نمونه‌های حاوی پودر لاستیک فرآوری شده کمتر می‌باشد که با نتایج پژوهش‌های پیشین [۷] مبنی بر تاثیر افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی در افزایش ضریب جذب صوت منطبق است. از سوی دیگر، مقادیر میانگین ضریب جذب صوت برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک و مقادیر متفاوت پودر لاستیک فرآوری شده نشان می‌دهد، پودر لاستیک فرآوری شده نسبت به پودر لاستیک معمولی در میانگین ضریب جذب صوت نمونه‌ها در بازه فرکانس مورد بررسی در این پژوهش تاثیر چندانی ایجاد نمی‌نماید.



شکل ۸- مقایسه میانگین ضریب جذب صوت نمونه‌ها در بازه فرکانس ۶۳ الی ۱۶۰۰ هرتز

۵- نتیجه‌گیری

۱. افزودن پودر لاستیک و پودر لاستیک فرآوری شده به مخلوط آسفالتی در شرایط پس از ساخت و همچنین پس از شبیه‌سازی شرایط جوی سبب افزایش میانگین ضریب جذب صوت آسفالت گردید که بیشترین میزان افزایش آن ۱۰۰٪ بوده است.
۲. تاثیر پودر لاستیک و مقادیر متفاوت پودر لاستیک فرآوری شده بر افزایش ضریب جذب صوت، با یکدیگر تفاوت قابل توجهی نداشته است.
۳. به طور کلی، پیرشدگی آسفالت تحت تاثیر عوامل جوی شامل رطوبت، دمای بالا و سیکل‌های ذوب و یخ سبب افزایش میانگین ضریب جذب صوت در بازه فرکانس ۶۳ الی ۱۶۰۰ هرتز گردید که بیشترین میزان افزایش آن تحت شرایط رطوبت، دمای بالا و سیکل‌های ذوب و یخ به ترتیب ۱۰۰٪، ۳۸٪، ۵۲٪ بوده است.

مراجع

- [1] T. Münzel, M. Sørensen, and A. Daiber, "Transportation noise pollution and cardiovascular disease," *Nat. Rev. Cardiol.*, vol. 18, no. 9, pp. 619–636, 2021, doi: 10.1038/s41569-021-00532-5.
- [2] M. M. Rahman *et al.*, "Perceived Noise Pollution and Self-Reported Health Status among Adult Population of Bangladesh," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 4, pp. 4–7, 2022, doi: 10.3390/ijerph19042394.
- [3] C. A. Toth *et al.*, "A stochastic simulation model for assessing the masking effects of road noise for wildlife, outdoor recreation, and bioacoustic monitoring," *Oecologia*, vol. 199, no. 1, pp. 217–228, 2022, doi: 10.1007/s00442-022-05171-2.
- [4] K. Heutschi, E. Bühlmann, and J. Oertli, "Options for reducing noise from roads and railway lines," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 94, pp. 308–322, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2016.09.019.
- [5] P. Mikhailenko *et al.*, "Low-Noise pavement technologies and evaluation techniques: a literature review," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 1911–1934, 2022, doi: 10.1080/10298436.2020.1830091.

- [6] P. Mikhailenko, Z. Piao, M. R. Kakar, S. Athari, M. Bueno, and L. D. Poulidakos, "Effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and acoustical properties of semi dense asphalt (SDA) mixtures," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 29, 2021, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00295.
- [7] V. F. Vázquez, J. Luong, M. Bueno, F. Terán, and S. E. Paje, "Science of the Total Environment Assessment of an action against environmental noise : Acoustic durability of a pavement surface with crumb rubber," *Sci. Total Environ.*, vol. 542, pp. 223–230, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.102.
- [8] M. Irfan, Y. Ali, S. Ahmed, and I. Hafeez, "Performance Evaluation of Crumb Rubber-Modified Asphalt Mixtures Based on Laboratory and Field Investigations," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 4, pp. 1795–1806, 2018, doi: 10.1007/s13369-017-2729-2.
- [9] Y. Zhang, Q. Li, J. Dong, and Q. Zhang, "Study on performance of rubber powder modified asphalt mixture," *Key Eng. Mater.*, vol. 599, pp. 252–256, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.599.252.
- [10] S. Bressi, N. Fiorentini, J. Huang, and M. Losa, "Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements : State of the Art and Statistics," 2019.
- [11] J. Sousa, A. Vorobiev, G. Rowe, and I. Ishai, "Reacted and activated rubber," *Transp. Res. Rec.*, no. 2371, pp. 32–40, 2013, doi: 10.3141/2371-04.
- [12] S. E. Paje, M. Bueno, F. Terán, R. Miró, F. Pérez-Jiménez, and A. H. Martínez, "Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber," *Appl. Acoust.*, vol. 71, no. 6, pp. 578–582, 2010, doi: 10.1016/j.apacoust.2009.12.003.
- [13] S. E. Paje, J. Luong, V. F. Vázquez, M. Bueno, and R. Miró, "Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, no. 2013, pp. 789–798, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.008.
- [14] F. M. Tehrani, "Noise abatement of rubberized hot mix asphalt: A brief review," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 58–61, 2015, doi: 10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(1).58.
- [15] L. Poulidakos *et al.*, "Use of waste and marginal materials for silent roads," *Proc. Int. Congr. Acoust.*, vol. 2019-Septe, no. September, pp. 491–498, 2019, doi: 10.18154/RWTH-CONV-239137.
- [16] C. Engineering, E. Sciences, and T. Universit, "RUBBER MODIFIED ASPHALT PAVEMENT LAYER FOR NOISE AND VIBRATION ABSORPTION," *Fac. Archit. Civ. Eng. Environ. Sci. Tech. Univ. Braunschweig*, no. November, 2019.
- [17] R. Mendes, G. Trichês, S. N. Y. Gerges, and E. F. Vergara, "Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures," *Appl. Acoust.*, vol. 114, pp. 266–274, 2016, doi: 10.1016/j.apacoust.2016.08.008.
- [18] A. Vaitkus, T. Andriejauskas, J. Gražulyte, O. Šernas, V. Vorobjovas, and R. Kleiziene, "Qualitative criteria and thresholds for low noise asphalt mixture design," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 356, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/356/1/012027.
- [19] G. Licitra, A. Moro, L. Teti, A. Del, and F. Bianco, "Modelling of acoustic ageing of rubberized pavements," *Appl. Acoust.*, vol. 146, pp. 237–245, 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.11.009.
- [20] "نشریه ۲۳۴- آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران،" ۱۳۹۰
- [21] ASTM D 6926, "Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall," *Annu. B. Am. Soc. Test. Mater. ASTM Stand.*, vol. i, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1520/D6926-10.1.5.
- [22] AASHTO, "AASHTO T283-Standard Method of Test for Resistance of Compacted," 2021.
- [23] "ISO 10534-2," *Acoust. — Determ. sound Absorpt. Coeff. impedance impedance tubes — Part 2 Transf. method*, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121878.
- [24] J. Hu, Z. Qian, Y. Liu, and M. Zhang, "High-temperature failure in asphalt mixtures using micro-structural investigation and image analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, pp. 136–145, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.090.
- [25] Y. Gao, Y. Zhang, F. Gu, T. Xu, and H. Wang, "Impact of minerals and water on bitumen-mineral adhesion and debonding behaviours using molecular dynamics simulations," *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 214–222, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.136.
- [26] H. Ali, N. Izz, M. Mubarak, and H. Ceylan, "ScienceDirect Effects of moisture damage on asphalt mixtures," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, no. xxx, 2020, doi: 10.1016/j.jtte.2020.07.001.
- [27] F. R. Apaza Apaza, V. F. Vázquez, S. E. Paje, L. Saiz, F. Gulisano, and J. Gallego, "The potential effect of crumb rubber on the maximum sound absorption performance of asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 389, no. February, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131789.
- [28] M. O. W Hassan, E. Kassem, M Al-Assi, O Sirin, "Acoustic Absorption Analysis and Modeling of Asphalt Mixtures," <https://www.astm.org/jte20180496.html>, 2019.
- [29] D. Yu, H. Jing, and J. Liu, "Effects of Freeze–Thaw Cycles on the Internal Voids Structure of Asphalt Mixtures," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 10, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3390/ma15103560.
- [30] L. Cong, M. Ren, J. Shi, F. Yang, and G. Guo, "Experimental investigation on performance deterioration of asphalt mixture under freeze–thaw cycles," *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 218–228, 2020, doi: 10.1016/j.ijst.2020.04.004.
- [31] A. Ongel, Q. Lu, and J. Harvey, "Frictional properties of asphalt concrete mixes," *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.*, vol. 162, no. 1, pp. 19–26, 2009, doi: 10.1680/tran.2009.162.1.19.