

# ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک

محسن عموزاده عمرانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

**E-mail: omrani@iausk.ac.ir**

امیر ایزدی، استادیار گروه عمران، دانشگاه شمال، آمل، ایران

فرشید جعفرزاده، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه شمال، آمل، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۳

## چکیده

آسفالت متخلخل، مخلوط آسفالتی خاصی با دانه‌بندی باز است، که دارای تعداد زیادی تخلخل متصل به هم با فضای خالی ۱۸ درصد و بالاتر می‌باشد. سر و صدای ناشی از ترافیک، پاشش، هیدروپلانینگ و لغزندگی از جمله مشکلات عمومی آسفالت‌های متراکم هستند. این باور وجود دارد، که روسازی آسفالت متخلخل جایگزینی مناسب برای حل مشکلات فوق به شمار می‌رود. هدف این مطالعه، علاوه بر بررسی ویژگی‌های مکانیکی، ارزیابی خصوصیات اصطکاک سطحی، بافت درشت و جذب صدای مخلوط‌های آسفالتی متخلخل حاوی پودرلاستیک و پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) است. بدین منظور، مخلوط‌های آسفالتی متخلخل با دو نوع دانه‌بندی مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. از پلیمر SBS و پودر لاستیک باز یافتنی جهت اصلاح قیر ۷۰-۶۰ استفاده شد. جهت ارزیابی مشخصات مورد نظر، آزمایش‌های حساسیت رطوبتی به روش ITS، سایش کانتابرو، فروریزش قیر، آونگ انگلیسی، پخش ماسه و جذب صدا بر روی نمونه‌ها انجام شد. بر اساس نتایج این پژوهش، پودرلاستیک تأثیری مثبت بر روی اصطکاک سطحی و تأثیری منفی بر روی جذب صدای مخلوط‌های آسفالت متخلخل پلیمری داشت. اگرچه دانه‌بندی دارای ریزدانه بیشتر، در مقایسه با دانه‌بندی دیگر، تأثیر بهتری بر روی اصطکاک سطحی داشت. علاوه بر این، افزودن پودرلاستیک به مخلوط‌های آسفالت متخلخل پلیمری سبب کاهش جذب صدا در تمامی فرکانس‌های بین ۱۲۵ تا ۱۲۵۰ هرتز شد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت متخلخل، اصطکاک سطحی، پودرلاستیک، جذب صدا، قیر پلیمری

## ۱. مقدمه

[Wang, 2016]. مطابق با نتایج مطالعات، سر و صدای حاصل از تماس آسفالت و تایر برای خودروهای سواری، در سرعت‌های بالای ۴۰ کیلومتر بر ساعت و برای کامیون‌ها، در سرعت‌های بالای ۶۰ کیلومتر بر ساعت، سر و صدای ترافیکی غالب به‌شمار می‌رود [Chu, Fwa and Tan, 2017]. لایه رویه روسازی، نقش بسزایی در تولید و انتشار سر و صدای تایر ایفا می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از بتن آسفالتی متخلخل می‌تواند در مقایسه با مخلوط آسفالتی متداول با دانه‌بندی متراکم، منجر به کاهش قابل توجهی در سر و صدای حاصل از تماس آسفالت و تایر شود [Wang, 2016; Praticò, et al., 2020]. اصلاح‌کننده‌های خرده‌لاستیکی (CRM)<sup>۲</sup> به دو روش مختلف، شامل فرآیند مرطوب و فرآیند خشک، به مخلوط‌های آسفالتی اضافه می‌شوند. در فرآیند مرطوب، خرده‌لاستیک ریزدانه‌تر (با اندازه‌های کوچکتر از ۱ میلی‌متر) با قیر به میزان ۱۰ تا ۲۵ درصد وزن چسبنده قیری در دمای بالا (۱۷۰ تا ۲۰۵ سانتیگراد) مخلوط می‌شود. سپس، برای تولید بتن آسفالتی، این مواد در ظرفی با مصالح سنگی مخلوط می‌شوند. در فرآیند خشک، خرده‌لاستیک‌های بزرگ‌تر (با اندازه‌های ۱ تا ۸ میلی‌متر) مستقیماً با سنگدانه‌ها به نسبت وزنی ۱ تا ۳ درصد وزن کل مصالح سنگی در ظرفی مخلوط می‌شوند، تا بتنی آسفالتی به نام مخلوط آسفالت لاستیکی تولید شود [Xie and Shen, 2016].

بسیاری از محققان به بررسی تأثیر اصلاح‌کننده پودرلاستیک بر روی خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالت متخلخل پرداخته‌اند. همه مطالعات حاکی از مفید بودن این مواد در بهبود مقاومت شیارشدگی، پیرشدگی، رفتار خستگی و حساسیت رطوبتی هستند [Xiao and Amirkhani, 2010; Taherkhani, Bayat and Akbari, 2020].

آزمایش‌های فشاری سه‌محوری نشان می‌دهند که احتمال شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی متخلخل ساخته‌شده با اصلاح‌کننده‌های پودرلاستیکی، نسبت به روکش‌های آسفالتی

روسازی آسفالت متخلخل، که در ابتدا لایه اصطکاکی با دانه‌بندی باز (OGFC)<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شد، از دهه ۱۹۵۰ در مناطق مختلف ایالات متحده، برای کاهش سر و صدای ناشی از ترافیک و بهبود مقاومت اصطکاکی سطح، استفاده شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). در بسیاری از کشورها، از رویه‌های بتن آسفالتی متخلخل به‌طور معمول در بزرگراه‌ها، برای کاهش سر و صدای ترافیک و بهبود میدان دید و ایمنی رانندگی در هوای بارانی، استفاده می‌شود [Liu, 2014].

برای ایجاد مقاومت لغزندگی و کاهش پاشش آب، سر و صدا و بازتاب آینه‌ای نور در شرایط بارانی، سطح مطلوب در جاده‌هایی که سرعت آمد و شد خودروها در آنها متوسط تا زیاد است، معمولاً سطحی با بافت درشت‌دانه است [Lay, 2009]. مقاومت لغزندگی روسازی عمدتاً به ناهمواری سطح، شامل بافت ریز و بافت درشت بستگی دارد [Chai, 2020; Yu, 2015]. از سوی دیگر، نبود اصطکاک کافی بین سطح تماس آسفالت و تایر منجر به تصادفات وسایل نقلیه موتوری می‌شود [Van der Zwan, 1990]. ایمنی مهم‌ترین عامل در جاده‌های مرطوب است که به بافت سطحی ارتباط دارد. همبستگی‌های آماری معناداری بین مقاومت لغزندگی جاده و حوادث پیش‌آمده در آب و هوای بارانی وجود دارد [Razzaq, 2020]. سازمان‌های بزرگراهی از روسازی‌های آسفالت متخلخل در قالب راه‌حلی برای بهبود عملکرد مقاومت لغزندگی روسازی‌ها در شرایط جوی مرطوب استفاده کرده‌اند [Zhang, et al., 2016].

اختلال ناشی از آلودگی صوتی یکی از مهم‌ترین پیامدهای سلامت زیست‌محیطی است. سر و صدای ناشی از ترافیک جاده‌ای یکی از بزرگ‌ترین آلاینده‌های صوتی در جهان صنعتی شناخته شده است، که اثر متقابل تماس آسفالت و تایر در سرعت‌های بالا بیشترین سهم را در این آلاینده‌ها دارد [Camomilla, Malgarini and Gervasio, 1990].

متخلخل پلیمری، معطوف به بررسی خصوصیات مکانیکی این نوع آسفالت‌ها بوده است. بررسی خصوصیات سطحی آسفالت متخلخل با افزودن توامان پلیمر SBS و درصد‌های مختلف پودر لاستیک و تحلیل در رابطه با خصوصیات بهینه آنها، یک رویکرد جدید خواهد بود. همچنین این تحقیق ضمن استفاده از لاستیک ضایعاتی به‌عنوان پسماند حاصل از صنعت و رفع مشکلات ناشی از دفع این نوع مصالح در طبیعت، علاوه بر حفظ محیط زیست، باعث کاهش هزینه‌های مربوط به مصرف مصالح طبیعی می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

این بخش شامل ویژگی‌های مصالح سنگی آهکی و قیر پلیمری لاستیکی، به‌عنوان مواد مورد استفاده در این تحقیق و همچنین طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه است.

### ۲-۱- مشخصات مصالح

مصالح اصلی به‌کاررفته در این تحقیق، شامل مصالح سنگی آهکی با دو نوع دانه‌بندی و قیر ۷۰-۶۰ پلیمری (با ۵ درصد SBS) حاوی پودر لاستیک دورریز تیر به مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد است.

### ۲-۱-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی آسفالت متخلخل مخلوطی از سنگدانه‌های درشت، ریز و فیلر است که دارای دانه‌بندی باز یا میان‌تهی بوده و مصالح سنگی درشت‌دانه (مانند روی الک #۴) درصد خیلی زیادی از ترکیب مصالح سنگی را تشکیل می‌دهند، به طوری که بیش از ۷۰٪ سنگدانه‌ها درشت‌دانه هستند [Mallick, et al., 2000]. برای آنکه آسفالت متخلخل عملکرد مناسبی در طول عمر سرویس‌دهی داشته باشد، به سنگدانه‌هایی با کیفیت بالا نیاز است. در این پژوهش، مصالح سنگی مورد نظر از معدن تولید شن و ماسه آزادراه شمال-تهران تامین شد. از سنگدانه‌های شکسته آهکی به‌عنوان مصالح درشت‌دانه و

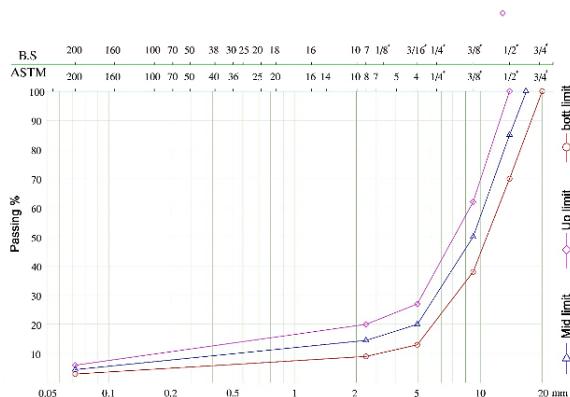
متداول، بالاتر است [Yang and Yin, 2009]. اصلاح‌کننده‌هایی نظیر SBS نیز باعث تغییر رفتار رئولوژیکی قیر می‌شوند. از این مواد، به‌طور کلی، برای تثبیت غشای قیر در اطراف ذرات سنگدانه استفاده می‌شود [Nielsen, 2006; Ameri, et al., 2018; Gupta, Rodriguez-Hernandez and Castro-Fresno, 2019; Praticò, et al., 2020]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که پودر لاستیک و استایرن-بوتادین-استایرن، از یک سو، نفوذپذیری آسفالت متخلخل را کاهش و از سوی دیگر، مقاومت شیارشدگی آن را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. علاوه بر این، افزودن بیش از اندازه پودر لاستیک به مخلوط، علی‌رغم آن‌که باعث بهبود اولیه مدول برجهنگی، مقاومت لغزندگی و مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی می‌شود، تأثیری منفی بر روی این ویژگی‌ها دارد [Shirini and Imaninasab, 2016; Nazarinasab, Ghasemi and Marandi, 2018].

هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر چسبنده پلیمری اصلاح‌شده با لاستیک بر مخلوط‌های آسفالتی متخلخل است. این مطالعه علاوه بر بررسی ویژگی‌های مکانیکی؛ شامل، حساسیت رطوبتی و میزان فرو ریزش قیر، به بررسی ویژگی‌های فیزیکی سطحی؛ شامل، اصطکاک سطحی، بافت و امپدانس (ناگذرایی) صدا در آسفالت متخلخل با دو دانه‌بندی مختلف تحت تأثیر چسبنده پلیمری اصلاح‌شده با لاستیک می‌پردازد. در این مطالعه، قیرهایی با درصد‌های مختلف لاستیک (به روش اختلاط مرطوب) و ۵ درصد SBS با دو نوع مختلف دانه‌بندی مصالح سنگی، مخلوط شدند و اصطکاک سطحی، بافت و جذب صوت مخلوط‌های آسفالت متخلخل حاوی این چسبنده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

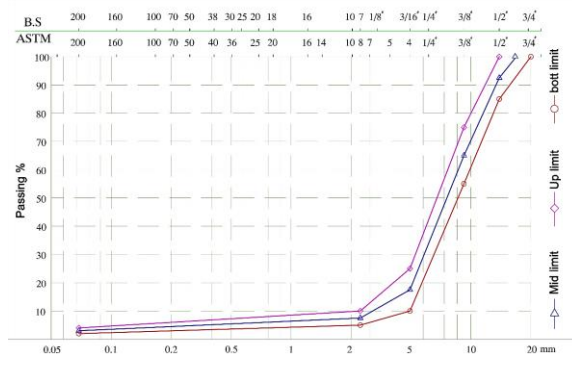
در پژوهش‌های پیشین، بررسی تأثیر استفاده جداگانه و ترکیبی پلیمر SBS و پودر لاستیک بر خواص مکانیکی و فیزیکی سطحی روسازی متخلخل مورد مطالعه و مقایسه قرار نگرفته است. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه آسفالت متخلخل و

شده است [Schaus, 2007]. دانه‌بندی‌های منتخب مصالح سنگی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، دانه‌بندی نوع ۲، ریزدانه (رد شده از الک ۸) و فیلر بیشتری نسبت به دانه‌بندی نوع ۱ دارد.

ریزدانه استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی این مصالح در جدول ۱ ارائه شده است. دو نوع دانه‌بندی میان‌مرزی برای مخلوط‌های آسفالت متخلخل مطابق با نظر انجمن ملی روسازی آسفالت (NAPA) انتخاب



دانه‌بندی نوع ۲



دانه‌بندی نوع ۱

شکل ۱. انواع دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی

مشخصات فنی		نتایج	استاندارد	ویژگی‌ها
حداکثر	حداقل			
<b>مصالح سنگی درشت‌دانه</b>				
۲۰	-	۲۰	ASTM C131	آزمایش سایش لوس آنجلس (%)
۱۵	-	۰/۳	ASTM C88	درصد افت وزنی با سولفات سدیم در ۵ سیکل (%)
۵	-	۵	BS 812-105.1	شاخص کشیدگی (ازدیاد طول) (%)
۲۰	-	۱۵	BS812-105.2	شاخص تورق (%)
۲	-	۱/۱۰	ASTM C127	جذب آب (%)
-	۱۰۰	۱۰۰	ASTM D5821	شکستگی در یک جبهه (%)
-	۹۰	۹۵	ASTM D5821	شکستگی در دو جبهه و بیشتر (%)
<b>مصالح سنگی ریزدانه</b>				
مشخصات فنی		نتایج	استاندارد	ویژگی‌ها
حداکثر	حداقل			
-	۵۰	۸۰	AASHTO T104	ارزش ماسه‌ای (%)
-	۱۰۰	۱۰۰	ASTM C88	شکستگی (%)
-	۱	۴/۵	AASHTO M17	فیلر (%)

۲-۱-۲ چسبنده قیری

به علت بافت باز آسفالت متخلخل، لایه نازک قیر سریعتر دچار هوازدگی شده و در نتیجه اکسیداسیون سریع قیر، موجب شکنندگی و خرابی می‌شود. به همین دلیل، استفاده از قیرهای با ویسکوزیته زیاد ارجحیت نخواهد داشت. زیرا قیر سخت، سریعتر به نقطه بحرانی سختی می‌رسد. [Guideline 384-2, 2015]

در این پژوهش، قیر AC60/70 با PG64-22، که کاربرد گسترده‌ای در ایران دارد، به‌عنوان قیر خالص مورد استفاده قرار گرفت. یکی از مشکلات مخلوط‌های آسفالتی متخلخل، جاری‌شدن قیر از مصالح سنگی به دلیل ویسکوزیته کم یا میزان قیر زیاد می‌باشد. روش متداول برای حل این مشکل افزودن الیاف سلولزی یا پلیمر به قیر می‌باشد. [Guideline 384-2, 2015] SBS مورد استفاده در این پژوهش، محصول کشور کره بوده است. برای ساخت چسبنده‌های قیری، در ابتدا، SBS با غلظت ۵ درصد وزن قیر، به قیر خالص افزوده شد. آنگاه، پودرلاستیک (تهیه شده از کارخانه تایر یزد) با اندازه ۰/۶ میلی‌متر و سه درصد مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد)، به‌روش اختلاط مرطوب و به‌وسیله آسیاب کلوئیدی هموژنیزه<sup>۳</sup> (HCM) در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۵۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه با قیر پلیمری مخلوط شد. بنابراین، دو نوع کلی چسبنده قیر به دست آمد: یکی تنها با ۵ درصد SBS و دیگری با ۵ درصد SBS همراه با درصد‌های مختلف پودرلاستیک. در جدول ۲، مشخصات فیزیکی قیر خالص ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر خالص

ویژگی‌ها	مشخصات فنی	نتایج
درجه نفوذ (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد)	ASTM D5	۶۴
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D36	۵۰
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه	ASTM D70	۱/۰۱
سانتی‌گراد (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		

۲-۲ طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه

طرح اختلاط آسفالت متخلخل بر اساس روش مرکز ملی تکنولوژی آسفالت (NCAT)،<sup>۴</sup> به طور کلی بر مبنای انتخاب نوع سنگدانه، دانه‌بندی، درصد بهینه قیر و حساسیت رطوبتی است. این روش پیشنهاد می‌دهد که از قیر اصلاح‌شده برای بهبود مقاومت در برابر افت وزنی ذرات در نمونه‌های بتن آسفالتی متخلخل استفاده شود. این مخلوط به دلیل چسبندگی و ویسکوزیته بالاتر، دارای دوام بیشتری است. [Ruiz, et al., 1990].

نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۶۰ میلی‌متر با دستگاه متراکم کننده چرخشی سوپرپیو (SGC)<sup>۵</sup> ساخته شدند، که پارامترهای تنظیمات آن در جدول ۳ آمده است. در طراحی آسفالت متخلخل براساس نشریه ۲-۳۸۴ (دستورالعمل طرح، اجرا و نگهداری آسفالت متخلخل)، برای هر دانه‌بندی آزمایشی، نمونه‌ها با درصد‌های مختلف قیر با استفاده از ۵۰ ضربه چکش مارشال به هر طرف نمونه یا با ۵۰ دوران متراکم کننده چرخشی (ژیراتوری) متراکم می‌شوند. [Guideline 384-2, 2015].

چهار نوع نمونه با دانه‌بندی نوع ۱ و درصد قیر پلیمری بهینه (شامل نمونه حاوی ۵ درصد SBS به عنوان نمونه پایه، و نمونه‌های حاوی ۵ درصد SBS و به ترتیب با ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد پودرلاستیک) آماده شد. چهار نوع نمونه نیز به همین ترتیب با دانه‌بندی مصالح نوع ۲ و درصد قیر پلیمری مشابه با نوع ۱ ساخته شد. در نتیجه، ۸ نوع نمونه برای آزمایش آماده شد. در طول ساخت نمونه‌ها، دستگاه SGC روی تخلخل ۲۰ درصد تنظیم شده بود. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و دستگاه متراکم کننده چرخشی سوپرپیو استفاده‌شده در این مطالعه، در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای تنظیمات SGC

پارامترهای تنظیمات	مقدار
سطح تنش (کیلوپاسکال)	۶۰۰

که در آن،  $W_1$  وزن اولیه نمونه،  $W_2$  وزن نهایی نمونه و  $CL$  افت وزنی یا افت کانتابرو (%) است.

### ۳-۲ آزمایش حساسیت رطوبتی

به دلیل کاربرد آسفالت متخلخل در مناطق با بارندگی زیاد، انتخاب قیر مقاوم در برابر آب مساله مهمی می باشد. وجود آب در بتن آسفالتی باعث کاهش میزان چسبندگی بین سنگ دانه ها و قیر می شود و روند خرابی هایی نظیر ترک خوردگی، دانه دانه شدن و غیره را تسریع می بخشد [Behiry, 2013]. حساسیت رطوبتی یکی از مهم ترین مشخصات در مخلوط های آسفالت متخلخل در معرض آسیب ناشی از آب است [Vamegh, Ameri and Jarahi, 2019]. این آزمایش مطابق با روش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T-283, 2014)، که یکی از پرکاربردترین روش ها برای تعیین آسیب های رطوبتی در مخلوط های آسفالتی است، انجام شد. بدین ترتیب که نمونه ها با سرعت بارگذاری ۵۰ میلی متر در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در دستگاه IDT (مقاومت کششی غیرمستقیم) قرار گرفتند. نمونه ها دارای قطری معادل ۱۰۰ میلی متر و ارتفاعی معادل ۶۸ میلی متر بودند. نسبت مقاومت کششی (TSR) را می توان با معادله (۲) به دست آورد.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (2)$$

که در آن،  $S_2$  مقاومت کششی متوسط نمونه های اشباع شده (کیلو پاسکال) و  $S_1$  مقاومت کششی متوسط نمونه های خشک (کیلو پاسکال) است.

حداقل مقدار TSR مجاز برای این روش آزمایش ۷۰ درصد است. مقاومت کششی هر یک از نمونه ها از طریق معادله (۳) قابل محاسبه است:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi \times t \times D} \quad (3)$$

که در آن، ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلو پاسکال)،  $P$  بار نهایی در لحظه شکست (نیوتن)،  $t$  ضخامت نمونه (میلی متر) و  $D$  قطر نمونه (میلی متر) است.

مقدار	پارامترهای تنظیمات
۵۰	تعداد چرخش
۱,۲۵	زاویه (درجه)
۳۰	سرعت دوران (rpm)

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

اصول طراحی مخلوط های آسفالت متخلخل بر تعیین درصد قیری است، که ویژگی های مکانیکی مرتبط با رفتار سرویس دهی در طول عمر روسازی را بهینه سازی کند [Ruiz, et al., 1990]. در این پژوهش، آزمایش های مرتبط با تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی متخلخل؛ نظیر، سایش کانتابرو، حساسیت رطوبتی به روش کشش غیرمستقیم و فروریزش قیر بر روی مخلوط های با دانه بندی نوع ۲ انجام شد. آزمایش های مربوط به مشخصات سطحی این مخلوط ها، از جمله آزمایش های آونگ انگلیسی، پخش ماسه برای تعیین متوسط عمق بافت رویه های آسفالتی متخلخل پلیمری-لاستیکی و جذب صوت، بر روی مخلوط های شامل هر دو نوع دانه بندی انجام شد.

### ۳-۱ آزمایش سایش کانتابرو

آزمایش کانتابرو بر اساس ASTM D7064 برای ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر افت وزنی ذرات انجام شد. نمونه های مترکم دارای ۱۰۰ میلی متر قطر و ۶۸ میلی متر ارتفاع در دستگاه آزمایش لوس آنجلس بدون گلوله های فلزی قرار داده شدند. بعد از اینکه محفظه دستگاه لوس آنجلس به اندازه ۳۰۰ دور با سرعت ۳۰ الی ۳۳ دور در دقیقه دوران کرد، مصالح سست جدا شده از سطح نمونه آزمایشی، خارج شدند. حجم نمونه ها، قبل و بعد از انجام آزمایش، اندازه گیری شد. درصد کاهش وزن نمونه های پایه در قالب سایش کانتابرو یا افت کانتابرو با فرمول (۱) محاسبه می شوند. درصد سایش کانتابرو باید کمتر از ۲۵ درصد باشد.

$$CL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک

### ۳-۳ آزمایش فروریزش قیر

این مشکل معمولاً مخصوص آسفالت متخلخل است و در اثر زهکشی قیر از منافذ و فرونشست آن به پایین لایه آسفالت متخلخل رخ می‌دهد و باعث از دست رفتن قیر سطحی و در نهایت اضمحلال لایه می‌شود. این موضوع ممکن است ناشی از گرانش، حمل و نقل مخلوط و نیز عملیات ساخت باشد. ریزش قیر، به خصوص وقتی رخ می‌دهد که آسفالت با درصد کم ریزدانه و درصد بالای قیر ساخته می‌شود. این آزمایش براساس استاندارد ASTM D 6390 انجام شد. برای انجام این آزمایش، ابتدا جرم خالی سبد سیمی محاسبه می‌شود. برای تعیین میزان ریزش قیر در این مخلوط‌ها، نمونه‌های غیرمتراکم آزمایشگاهی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع

۶۸ میلی‌متر آماده‌سازی می‌شود. سپس، این نمونه‌ها در یک سبد استاندارد مخصوص فروریزش قیر قرار می‌گیرد (شکل ۳). جرم سبد سیمی به علاوه نمونه با خطای ۰/۱ گرم نیز محاسبه می‌شود. جرم ورق یا نگهدارنده نیز تعیین و ثبت می‌گردد. سپس نمونه به‌همراه سبد و سینی به مدت یک ساعت داخل گرمخانه که دمای آن ۱۰ درجه سانتیگراد از درجه حرارت تولید بیشتر است، قرار داده می‌شود. با توجه به دمای مورد نیاز، مخلوط در زمان یک ساعت  $\pm 5$  دقیقه تهیه می‌شود. بعد از مدت یک ساعت، مجموعه از گرمخانه خارج و اجازه داده می‌شود تا سرد گردد. سپس جرم ورق به علاوه میزان مصالح خارج شده با خطای ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۲. آماده‌سازی نمونه و طرح اختلاط به وسیله دستگاه متراکم کننده چرخشی سوپرپیو

پس از آن، مقدار فروریزش قیر در هر مخلوط تعیین می‌شود. فروریزش قابل قبول برای آسفالت متخلخل کمتر از ۰/۳ درصد پیشنهاد شده است. میزان فروریزش قیر از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\text{draindown} = \frac{D-C}{B-A} \times 100 \quad (4)$$

که در آن، A جرم سبد خالی، B جرم سبد به علاوه نمونه، C جرم ورق یا نگهدارنده و D جرم ورق به علاوه مصالح خارج شده است.



شکل ۳. آزمایش جاری شدن قیر

### ۳-۴ آزمایش آونگ انگلیسی (BPN)<sup>۷</sup>

یکی از خطرات عمده رانندگی در شرایط بارانی، پدیده آبلغزی است؛ یعنی، تشکیل لایه‌ای از آب بین تایر و سطح جاده که باعث قطع ارتباط بین آنها می‌گردد. تصادفات در اثر لغزش نه تنها در اثر سرخوردن مستقیم ناشی از قفل شدن چرخ‌ها (در حین توقف اضطراری) بلکه در اثر سرخوردن در پیچ‌ها (جایی که فقط یک چرخ یا یک جفت از چرخ‌ها قفل می‌شوند) نیز اتفاق می‌افتد. بیشتر تصادفات در شرایط خیس یا یخ‌زدگی رویه راه اتفاق می‌افتند. بنابراین اندازه‌گیری‌های مقاومت لغزشی معمولاً بر روی روسازی‌های خیس انجام می‌شوند [Haas, Hudson and Zaniewski, 1994].

از دستگاه آونگ انگلیسی برای اندازه‌گیری مقاومت لغزشی و بررسی بافت ریز سطح روسازی استفاده می‌شود. از آنجایی که بافت ریز سطح موجب ایجاد چسبندگی با لاستیک تایر می‌شود، در ایجاد اصطکاک سهم خواهد بود. در این مطالعه، مقاومت لغزندگی آسفالت متخلخل مطابق با روش آزمایش استاندارد برای اندازه‌گیری ویژگی‌های اصطکاک سطحی (ASTM E303-93) ارزیابی شد. از نمونه‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر در این آزمایش استفاده شد، زیرا مسیر تماس پیشنهادی برای کفشک (پاشنه) آونگ انگلیسی بر روی سطح بتن آسفالتی بین ۱۲۴ و ۱۲۷ میلی‌متر است. پایه آن، با ساخت وسیله مخصوصی برای محکم نگه داشتن نمونه‌ها در جای خود، برای تطبیق با نمونه‌های ۱۵ سانتی‌متری تنظیم شد. علاوه بر این، پیچ‌های تنظیم ارتفاع آونگ با پیچ‌های بلندتر تعویض شدند تا بتوان نمونه‌هایی با ارتفاع ۶ سانتی‌متر را هم در دستگاه قرار داد.

در انجام این آزمایش، سطح نمونه آزمایشی کاملاً با آب مرطوب و ضامن آونگ از حالت قفل آزاد می‌شود تا تحت اثر وزن به حرکت درآمده و اسلایدر بر روی سطح نمونه بلغزد. اسلایدر بر اثر حرکت و پس از عبور از روی سطح نمونه به عقبه ضربه زده و آن را به سمت بالا بر روی گیجی که از

صفر تا ۱۵۰ مدرج شده می‌راند. عدد مربوطه قرائت و یادداشت می‌شود. پنج دوران بر روی نمونه انجام می‌گیرد که عدد متناظر با اولین دوران یادداشت نمی‌گردد. نتیجه آزمایش در هر ناحیه، میانگین ۴ دورانی است که اختلاف آنها بیشتر از ۳ واحد نباشد. پس از پایان آزمایش، دمای آب پخش شده بر سطح نمونه بلافاصله اندازه‌گیری می‌شود. سپس نتایج نسبت به دما تصحیح و اعداد اصلاح می‌شوند. شکل ۴ مراحل آزمایش آونگ انگلیسی را نشان می‌دهد. این آزمایش ۵ بار بر روی هر نمونه انجام شد.

### ۳-۵ آزمایش پخش ماسه

روش پخش ماسه یکی از آزمایش‌های مرسوم اندازه‌گیری بافت درشت در سرتاسر دنیا می‌باشد. این آزمایش در کشورهای زیادی بصورت استاندارد درآمده و توصیه می‌شود که مطابق استاندارد ASTM E965 انجام شود [Guideline 384-2, 2015]. بافت درشت به زبری اشاره دارد، که از ترتیب استقرار دانه‌ها ناشی می‌شود. شکل، اندازه، دانه‌بندی مصالح سنگی درشت‌دانه و ترتیب استقرار دانه‌ها تعیین‌کننده این نوع بافت می‌باشد. خصوصیات مخلوط و عوامل محیطی همانند درجه حرارت بر چگونگی مقاومت بافت درشت در برابر ترافیک اثرگذار هستند.

در این آزمایش از حجم مشخصی ماسه استاندارد یا گوی شیشه‌ای (پودر شیشه) استفاده می‌شود، که در سطح راه با استفاده از یک صفحه بصورت دایروی پخش می‌شود.

جهت انجام این آزمایش، ابتدا خشک و تمیز بودن سطح نمونه‌ها کنترل گردید. سپس احجام معینی از ماسه بر روی سطح نمونه ریخته و با دیسک لاستیکی دایروی پخش شد. عمل پخش تا جایی ادامه یافت که حفره‌های سطح نمونه‌ها کاملاً تا بالای سنگدانه‌ها پر شد. آنگاه قطر در چهار جهت اندازه‌گیری شده و میانگین آن بدست آمد. با تقسیم حجم ماسه بکاررفته بر میانگین مساحت ماسه پخش‌شده، عمق متوسط بافت درشت (MTD)<sup>۸</sup> مطابق رابطه (۵) محاسبه گردید:



## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک

ایجاد می‌شود، منعکس می‌شود. آزمایش جذب صوت در شکل ۵ نشان داده شده است.

فشار موج صوتی خارج شده از منبع صوت که با سطح برخورد می‌کند، در لوله امپدانس موج-صفحه (موج تابشی) را می‌توان با رابطه (۶) نشان داد:

$$p_i = A \cos(2\pi ft) \quad (6)$$

موج بازتابی در همان نقطه را می‌توان با رابطه (۷) نشان داد:

$$p_r = B \cos(2\pi ft(t - \frac{2x}{c})) \quad (7)$$

که در آنها،  $f$  فرکانس (هرتز)،  $t$  زمان (ثانیه)،  $x$  فاصله از سطح نمونه (متر)،  $c$  سرعت صوت در لوله (متر بر ثانیه) و  $A$  و  $B$  دامنه‌ها هستند. سپس میکروفون، فشار نهایی صوت در لوله را اندازه‌گیری می‌کند، که از جمع جبری موج صوتی برخورد کرده با سطح و موج انعکاسی به دست می‌آید.

حال با توجه به اطلاعات بالا می‌توان فرمولی برای ضریب جذب ارائه نمود. با استفاده از تعریف ضریب جذب که نسبت انرژی جذب شده به انرژی تابشی به سطح نمونه است، در معادله (۸) خواهیم داشت:

$$MTD = \frac{V}{\pi r^2} \quad (5)$$

که در آن:

$V$ : حجم ماسه مصرفی ( $\text{mm}^3$ )

$r$ : میانگین شعاع دایره حاصل از پخش ماسه ( $\text{mm}$ )

$MTD$ : عمق متوسط بافت ( $\text{mm}$ )

### ۳-۶ آزمایش جذب صدا

اساس کار جذب در مواد متخلخل به این صورت است که امواج صوتی پس از برخورد به ماده جذب، وارد آن محیط شده و محیط آن را به ارتعاش در می‌آورد. در اثر ارتعاش بوجود آمده، موج صوتی در محیط تبدیل به گرما می‌شود؛ در نتیجه، موج صوتی میرا شده و انرژی صوتی به انرژی گرمایی تبدیل می‌گردد. امواج کم فرکانس، انرژی ارتعاشی کمتری ایجاد نموده و نهایتاً جذب کمتری نیز صورت می‌گیرد [Guideline 384-2, 2015].

آزمایش جذب صدا (ASTM E1050)، ضرایب جذب آکوستیک را از طریق یک لوله امپدانس با دو میکروفون اندازه‌گیری می‌کند. در این آزمایش، امواج صوت باید با زاویه عمود بر سطح، وارد مصالح شوند (زیرا ضریب جذب تابعی از زاویه تلاقی است). انرژی صوت با تغییر محیط (از هوا به نمونه)، به دلیل تغییر در امپدانس موج، که توسط خود موج



شکل ۴. مراحل انجام آزمایش آونگ انگلیسی

$$\alpha = \frac{A^2 - B^2}{A^2} = 1 - r^2 \quad (8)$$

در آن  $r = \frac{B}{A}$  ضریب بازتاب می‌باشد.

## ۴. نتایج و بحث

### ۴-۱ طرح اختلاط

در طرح مخلوط‌های آسفالت متخلخل باید نوعی سازگاری بین تخلخل و مقاومت در برابر اضمحلال برقرار باشد و ضمن بالا بودن درصد فضای خالی نمونه، مقاومت در برابر اضمحلال نیز باید در حدی باشد، که در برابر تنش‌های مماسی چرخ و مکش ایجاد شده در اثر ترافیک، مقاومت کافی وجود داشته باشد. نوع و مقدار قیر باید به گونه‌ای انتخاب گردد که تاثیر همه عوامل مؤثر در آسفالت متخلخل از جمله زهکش شدن قیر، عریان‌شدگی و میران اضمحلال نمونه در سطح مطلوب باشند. براساس مشخصات فنی و استانداردها، حداکثر ۲۰ درصد افت وزنی کانتابرو در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مجاز است. در این پژوهش، تخلخل هدف معادل ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. درصد قیر مجاز بین ۴/۵ و ۶ درصد متغیر است. میزان قیر ۶ درصد که این مقدار حدی را تضمین می‌کند، به عنوان درصد قیر بهینه انتخاب شده است. این میزان قیر با استفاده از پلیمر و لاستیک و به تبع آن افزایش ویسکوزیته در قیرهای اصلاح شده، علاوه بر این که می‌تواند سبب بهبود چسبندگی شود، باعث تشکیل لایه‌های ضخیم‌تر قیر در اطراف سنگدانه می‌شود. به همین دلیل، بهبود در خصوصیات روسازی از جمله مقاومت در برابر رطوبت می‌تواند مورد انتظار باشد. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب، نمودارهای آزمایش‌های سایش کانتابرو و حساسیت رطوبتی را نشان می‌دهند.

### ۴-۲ مقاومت سایشی

برای سنجش میزان اضمحلال نمونه آسفالتی متخلخل (جداشدگی سریع ذرات تشکیل‌دهنده آسفالت متخلخل از هم) از آزمایش کانتابرو استفاده می‌شود. همچنین نتیجه حاصل از انجام این آزمایش می‌تواند برای بررسی چسبندگی مخلوط مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۶ نمودار آزمایش سایش کانتابرو را نشان می‌دهد. اعداد در این شکل، میانگین نتایج سه نمونه

هستند. با افزایش درصد قیر، میزان افت وزنی کاهش یافت، که بیانگر افزایش مقاومت سایشی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، در میزان قیر ۶٪، میزان سایش کانتابرو برای همه نمونه‌ها کمتر از ۲۵٪ است. همچنین، با افزایش پودر لاستیک، میزان سایش کانتابرو افزایش یافت، که مطابق با نتیجه به دست آمده از پژوهش Cetin است [Cetin, 2013].



شکل ۵. دستگاه آزمایش جذب صوت

### ۴-۳ حساسیت رطوبتی

در شکل ۷، نتایج آزمایش لاتمن اصلاح‌شده نشان داده شده است. اعداد در این شکل، میانگین نتایج سه نمونه هستند. با افزایش درصد قیر، میزان TSR افزایش یافت، که به دلیل افزایش چسبندگی و انسجام قیر و سنگدانه در مخلوط آسفالتی متخلخل است [Frigio and Canestrari, 2018]. همانطور که مشاهده می‌شود، در میزان قیر ۶٪، بجز برای نمونه حاوی ۱۵٪ پودر لاستیک، برای سایر نمونه‌ها، TSR بالای ۷۰٪ است، که می‌تواند بیانگر پیوند مناسب سنگدانه و قیر حتی در حضور آب و افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی باشد [Cetin, 2013]. همچنین، با افزایش پودر لاستیک، میزان TSR کاهش یافت.

## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک

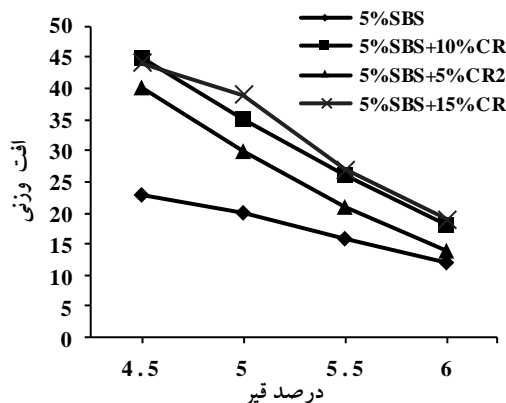
جدول ۴. نتایج آزمایش فروریزش قیر

ریزش قیر (%)	$m_i$	$m_f$	$m_t$	نوع مخلوط
۰/۲۸	۳۶۲/۵	۳۵۹/۳	۱۱۴۲/۴	5% SBS
۰/۲۳	۳۶۳/۴	۳۵۹/۷	۱۱۴۶/۳	5% SBS+5%CR
۰/۲۳	۳۶۵/۳	۳۶۲/۷	۱۱۴۸/۱	5% SBS+10%CR
۰/۲۱	۳۶۶/۵	۳۶۳/۲	۱۱۴۸/۷	5% SBS+15%CR

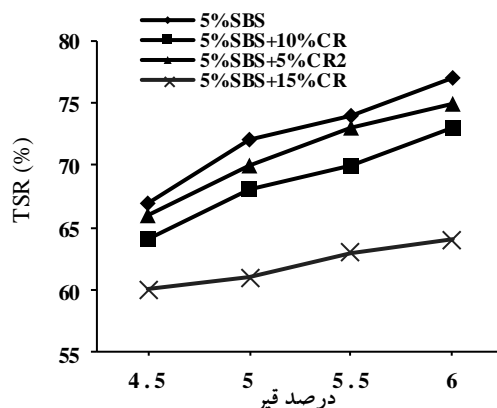
### ۴-۵ نتایج آزمایش آونگ انگلیسی

برای تامین مناسب توقف وسایل نقلیه در سرعت‌های نزدیک به  $80 \text{ km/h}$  بر روی روسازی در شرایط خشک و مرطوب نیاز به بافت ریز مناسب می‌باشد. در سرعت‌های بالاتر، وجود بافت ریز و درشت در شرایط مرطوب سطح روسازی برای تامین توقف مناسب وسایل نقلیه لازم است.

مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آونگ انگلیسی، با عنوان عدد آونگ انگلیسی (BPN) و یا (SN) یادداشت می‌گردد. در صورت اصطکاک بیشتر بین کفشک لغزنده آونگ و سطح نمونه، نوسان کند و آهسته شده و عدد لغزندگی بیشتری قرائت می‌شود. در نتیجه، هرچه عدد لغزندگی (SN) بیشتر باشد، مخلوط آسفالتی، مقاومت لغزندگی بالاتری دارد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده، به استثنای نمونه پایه با دانه‌بندی شماره ۱، بقیه مخلوط‌ها حداقل عدد لغزندگی مورد نظر اکثر راهنماهای مربوطه برای نواحی خطرناک و مهم از لحاظ لغزندگی (SN=65) را برآورده کرده‌اند [Razzaq Abdullah, 2020]. تمامی مخلوط‌های با دانه‌بندی شماره ۲، نسبت به مخلوط‌های دارای دانه‌بندی شماره ۱، SN بالاتری داشتند. به بیان دیگر، مخلوط‌های دارای ریزدانه بیشتر، مقدار SN بیشتری نسبت به مخلوط‌های با ریزدانه کمتر داشتند که می‌تواند ناشی از وجود میزان فیلر بیشتر در آن مخلوط‌ها باشد. همچنین، تمامی مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک، نسبت به مخلوط‌های پایه، دارای SN بزرگ‌تری بودند. به این دلیل که در فرآیند مرطوب، خرده لاستیک، جزئی از فرمولاسیون قیر شده و باعث افزایش اصطکاک بافت سرد شده چسباننده جدید



شکل ۶. نمودار نتایج آزمایش کانتابرو



شکل ۷. نمودار نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده

### ۴-۴ فروریزش قیر

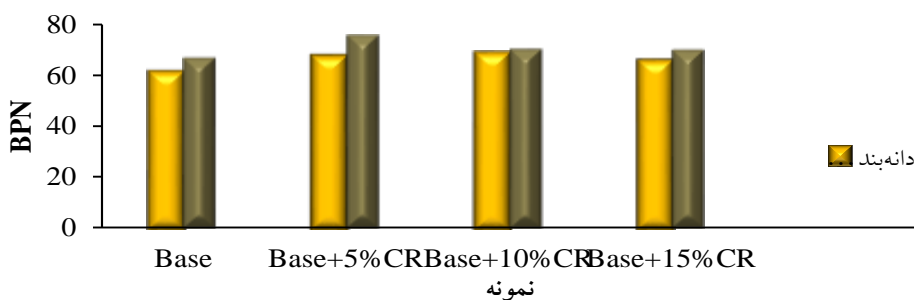
آزمایش فروریزش قیر بر روی انواع مخلوط‌های مختلف انجام شد. جدول ۴ نتایج آزمایش فروریزش قیر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، همه نمونه‌ها دارای مقادیر کمتر از  $0/3$  درصد قابل قبول برای آسفالت متخلخل هستند. البته با افزودن پودر لاستیک به چسبنده قیری پلیمری، میزان فروریزش قیر کاهش یافت. در مطالعات پیشین نیز نشان دادند، که درصد‌های بالاتر پودر لاستیک، با افزایش ویسکوزیته برای جلوگیری از فروریزش موثرتر خواهد بود [Arrieta and Maquilón, 2014; Cetin, 2013].

هدف از انجام این آزمایش، بررسی عمق متوسط بافت است. اگر قطر دایره بوجود آمده حاصل از پخش این مواد، کوچک باشد، نشان می‌دهد که عمق بافت زیاد بوده و بالعکس قطر زیاد، معرف عمق کم بافت سطح می‌باشد. در واقع، در صورتی که تخلخل مخلوط‌های آسفالتی بیشتر باشد، مقدار متوسط عمق بافت، بزرگتر خواهد بود. با توجه به نمودارهای شکل ۹، بجز نمونه حاوی ۱۵٪ پودر لاستیک، مقادیر MTD سایر نمونه‌های حاوی پودر لاستیک، از حداقل مورد نیاز (۲ میلی-متر) بیشتر است، که بیانگر عدم کاهش مقاومت لغزندگی در سرعت‌های ۵۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است [ASTM E965, 2019]. مقادیر MTD نمونه‌های دانه‌بندی شماره ۱ (فاقد فیلر)، بزرگتر از دانه‌بندی شماره ۲ می‌باشد. این بدان معناست که به دلیل وجود فیلر و ریزدانه‌های بیشتر در دانه‌بندی شماره ۲، مقدار فضای خالی کمتری در نمونه‌ها وجود داشته و بنابراین عدد متناظر کمتر بوده است. بجز مخلوط آسفالتی با قیر پایه، در میان نمونه‌های حاوی پودر لاستیک، نمونه حاوی ۱۰٪ پودر لاستیک، بیشترین مقدار عمق متوسط بافت را داشته است.

می‌گردد. بنابراین سطح روسازی حاوی پودر لاستیک که در آن از روش طرح اختلاط مرطوب استفاده شده است، دارای اصطکاک بیشتری ناشی از زبرتر شدن سطح قیر سرد شده، می‌باشد. بدین ترتیب، با افزودن پودر لاستیک به مخلوط‌های آسفالت متخلخل پلیمری، اصطکاک سطحی افزایش می‌یابد. مخلوط دارای دانه‌بندی شماره ۲ و حاوی ۵٪ لاستیک بیشترین مقدار اصطکاک سطحی (۷۵/۷۵) را دارا بود.

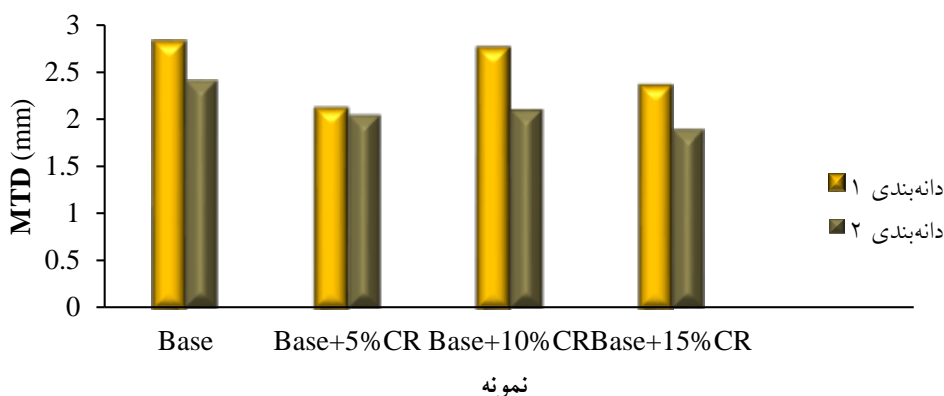
#### ۶-۴ نتایج آزمایش پخش ماسه

بافت درشت نقش مهمی در مشخصه‌های اصطکاکی رویه در شرایط مرطوب به‌ویژه در سرعت‌های بالا ایفا می‌کند. بنابراین روسازی‌هایی که اجرا می‌شوند، برای تطبیق با سرعت سفر ۸۰ km/h یا بیشتر بایستی دارای بافت درشت خوبی برای جلوگیری از پدیده آبلغزی باشند. بافت درشت علاوه بر تامین اصطکاک، نقش مهمی در ایجاد صدای ناشی از تماس تایر با روسازی، پاشش و شتک دارد. طول موج‌های بافت درشت، ۰/۵mm تا ۵۰mm و عمق بافت از ۰/۱mm تا ۲۰mm می‌باشد.



شکل ۸. نتایج آزمایش BPN

## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک



شکل ۹. نتایج آزمایش پخش ماسه برای تعیین متوسط عمق بافت

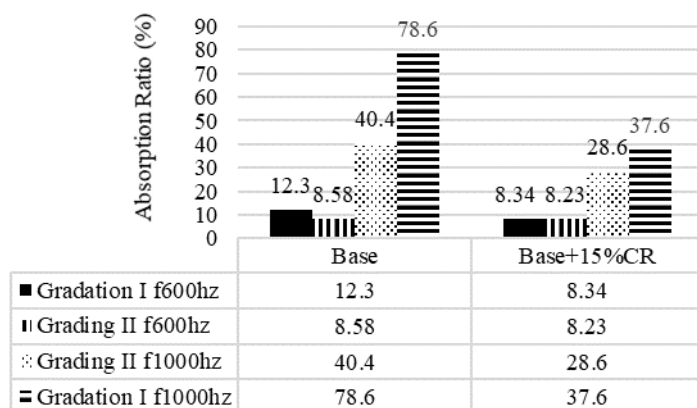
### ۷-۴ نتایج آزمایش جذب صوت

ضریب جذب صوت، بخشی از انرژی صوتی است، که هنگام انعکاس موج صدا توسط سطح مصالح جذب می‌گردد. به عبارت دیگر، ضریب جذب عبارت است از: "نسبت انرژی جذب شده" به "انرژی تابشی" که بین صفر تا ۱۰۰٪ تغییر می‌کند. هر چه ضریب جذب صوتی ماده‌ای بیشتر باشد، میزان افزایش صدای ناشی از انعکاس از سطح آن کمتر خواهد بود [Guideline 384-2, 2015]. رویه‌ای مانند آسفالت متخلخل با حجم فضای خالی بالا می‌تواند سبب کاهش اختلالات صوتی ناشی از ترافیک گردد. فرکانس بحرانی در جاده‌ای با سرعت رانندگی ۵۰ کیلومتر بر ساعت برابر با ۶۰۰ هرتز و در جاده‌هایی با سرعت رانندگی بیشتر یا مساوی ۸۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۱۰۰۰ هرتز است [Nazarinasab, Ghasemi and Marandi, 2018].

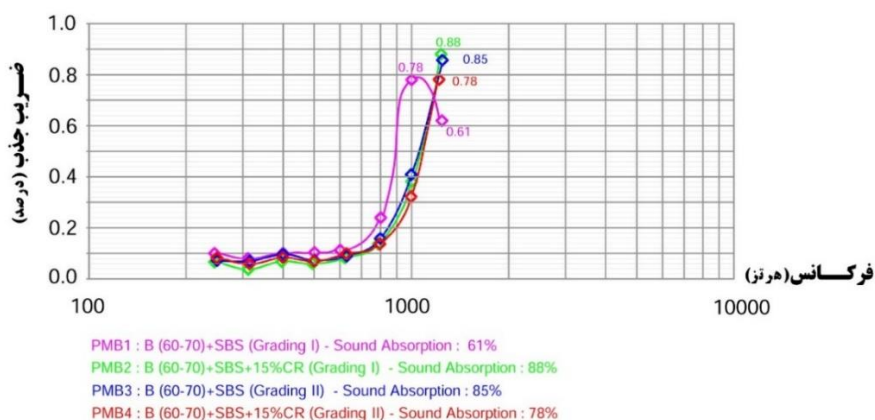
در شکل ۱۰ مخلوط‌های دارای دو دانه‌بندی مختلف و حاوی ۱۵٪ پودر لاستیک، با مخلوط پایه در فرکانس‌های ۶۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک به‌طور قابل توجهی دارای جذب صوت پایین‌تری نسبت به مخلوط پایه بودند. در واقع، به‌کارگیری پودر لاستیک به روش فرآیند مرطوب در مخلوط آسفالتی باعث افزایش ویسکوزیته سفتی قیر می‌گردد [Eskandarsefat et al., 2019; Sangiorgi

[et al., 2017]. افزایش سفتی قیر باعث می‌شود، که بافت سطح روسازی آسفالتی توپرتر شود و مقاومت بیشتری در برابر ورود امواج صوتی به سطح لایه آسفالتی داشته باشد. در فرکانس ۶۰۰ هرتز (که به وسایل نقلیه با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت اختصاص دارد)، میزان جذب صوت نسبت به فرکانس ۱۰۰۰ هرتز (که به وسایل نقلیه‌ای با سرعت‌های بالاتر یا مساوی ۸۰ کیلومتر بر ساعت اختصاص دارد) کمتر است. همچنین نمودار آزمایش جذب صوت، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مخلوط پایه در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز دارای بهترین جذب صوت است (حدود ۷۸ درصد). این شاخص در مخلوط‌های آسفالت معمولی حدود ۵ درصد است [Guideline 384-2, 2015]. می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک در فرکانس مربوطه دارای جذب صوت کمتری نسبت به مخلوط‌های بدون لاستیک هستند. این امر می‌تواند ناشی از تغییرات در هندسه شکل و خلل و فرج در این مخلوط‌ها باشد. در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز، جذب صوت نمونه پایه با دانه‌بندی ۱، کمتر از نمونه حاوی پودر لاستیک بوده است؛ در حالی که در همین فرکانس، جذب صوت نمونه پایه با دانه‌بندی ۲، بیشتر از نمونه حاوی پودر لاستیک بوده است. میزان جذب صوت در نمونه‌های با دانه‌بندی ۱ (فاقد فیلر)، بیشتر از نمونه‌های با دانه‌بندی ۲

(دارای فیلر) بوده است. این امر می‌تواند به دلیل وجود حفره‌های بازتر و بیشتر به واسطه عدم استفاده از فیلر باشد.



شکل ۱۰. نتایج آزمایش جذب صوت



شکل ۱۱. نمودار آزمایش جذب صوت

## ۵. نتیجه‌گیری

درصد SBS اصلاح شدند. علاوه بر آزمایش‌های مکانیکی مرتبط با این نوع مخلوط‌ها، آزمایش‌های پخش ماسه، آونگ انگلیسی و جذب صوت نیز انجام شد. اهم نتایج بدست‌آمده از این پژوهش را می‌توان این‌گونه برشمرد:

۱. با افزایش میزان پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالت متخلخل پلیمری، مقاومت سایشی کاهش، ولی حساسیت رطوبتی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، مقدار افت وزنی کانتابرو نمونه حاوی ۱۵٪ لاستیک نسبت به نمونه شاهد ۷٪ (۱۹٪ در برابر ۱۲٪) و کاهش نسبت مقاومت کششی آن ۱۳٪ (۶۴٪ در برابر ۷۷٪) بود؛ اگرچه افزایش پودر لاستیک، حداکثر تا ۱۰٪، علاوه بر پارامتر مقاومت سایشی، حداکثر میزان

این پژوهش، به مطالعه و ارزیابی امکان کاربرد تایرهای فرسوده حاصل از بازیافت لاستیک در مخلوط‌های آسفالت متخلخل پرداخت. در این مطالعه آزمایشگاهی، تاثیر پودر لاستیک همراه با استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) بر روی ویژگی‌های عملکردی و فیزیکی سطحی مخلوط‌های آسفالت متخلخل با دو نوع دانه‌بندی (نوع ۱ با ریزدانه کمتر و نوع ۲ با ریزدانه بیشتر) بررسی شد. از SBS جهت تغییر خصوصیات رئولوژی قیر و از پودر لاستیک به منظور بهره‌گیری بیشتر مواد ضایعاتی و بهبود خواص جذب صوت استفاده شد. مخلوط‌های آسفالت متخلخل از طریق فرآیند مرطوب با استفاده از پودر لاستیک در سه غلظت متفاوت (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن قیر) به همراه ۵

## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک

مؤثر در آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها، که سرعت‌های رانندگی در آنها بیشتر از ۸۰ کیلومتر در ساعت است، استفاده کرد.

۷. در مجموع می‌توان گفت، استفاده از پودر لاستیک بازیافتی در آسفالت متخلخل پلیمری، می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی-های زیست محیطی ناشی از دپوی آنها و کاهش هزینه‌های مربوط به مصرف مصالح طبیعی، باعث بهبود خصوصیات سطحی آسفالت متخلخل شود.

### ۶. پی‌نوشت‌ها

1. Open-graded friction course
2. Crumb rubber modifiers
3. Homogenizer colloid mill
4. National center asphalt technology
5. Superpave gyratory compactor
6. Tensile strength ratio
7. British pendulum number
8. Mean texture depth
9. Skid Number

### ۷. مراجع

- طاهرخانی، ح.، بیات، ح. و اکبری، ح. (۱۳۹۹) "بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره یازدهم، شماره چهارم، ص ۸۹۱-۹۱۲.

- نشریه ۲-۳۸۴ (۱۳۹۴) "مستندات و مبانی فنی دستورالعمل طرح، اجرا و نگهداری آسفالت متخلخل"، وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

- وامق، م.، عامری، م. و جراحی، آ. (۱۳۹۸) "بررسی آزمایشگاهی اثر پلیمر بر عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی متخلخل"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره شانزدهم، شماره چهارم، ص ۱۷۶-۱۶۵.

حساسیت رطوبتی مورد قبول مطابق با معیارهای موجود را برآورده کرد.

۲. با افزودن پودر لاستیک به مخلوط‌های آسفالت متخلخل پلیمری، اصطکاک سطحی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار این افزایش، مربوط به دانه‌بندی حاوی ریزدانه بیشتر و نمونه حاوی ۵٪ پودر لاستیک بود (۱۳/۵٪).

۳. مخلوط‌های آسفالت متخلخل با دانه‌بندی حاوی ریزدانه بیشتر، اصطکاک سطحی بهتری نسبت به دانه‌بندی حاوی ریزدانه کمتر دارند، که می‌تواند به دلیل وجود میزان فیلر بیشتر در این مخلوط‌ها باشد. در این پژوهش، بیشترین افزایش در اصطکاک سطحی ناشی از نوع دانه‌بندی، مربوط به نمونه حاوی ۵٪ پودر لاستیک بود (۱۳/۱٪).

۴. به‌کارگیری افزودنی پودرلاستیک در نمونه‌ها با دانه‌بندی‌های مختلف باعث کاهش مقادیر عمق متوسط بافت درشت شده-است، که نشانگر کاهش تخلخل در مخلوط‌های حاوی لاستیک است. بیشترین مقدار این کاهش نسبت به نمونه شاهد، مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ لاستیک و با دانه‌بندی حاوی ریزدانه بیشتر بود (۲۱/۶٪). همچنین مقادیر عمق متوسط بافت درشت، برای دانه‌بندی حاوی ریزدانه بیشتر، کمتر از دانه‌بندی حاوی ریزدانه کمتر می‌باشد؛ به‌طوری که در نمونه حاوی پودر لاستیک، اختلاف این مقادیر به ۲۳/۹٪ می‌رسد. در واقع، وجود فیلر و ریزدانه‌های بیشتر در دانه‌بندی، فضای خالی کمتری را در نمونه‌ها به وجود آورده است.

۵. با افزودن پودرلاستیک به مخلوط‌های آسفالت متخلخل پلیمری، جذب صوت در کلیه فرکانس‌ها، از ۱۲۵ تا ۱۲۵۰ هرتز، کاهش می‌یابد؛ اگرچه مقدار جذب صوت، نسبت به آسفالت‌های متداول بیشتر است.

۶. جذب صوت در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز نسبت به فرکانس ۶۰۰ هرتز بیشتر است. این اختلاف، برای دانه‌بندی با ریزدانه کمتر ۳/۶۶٪ و برای دانه‌بندی با ریزدانه بیشتر ۳۱/۸۲٪ بود. از این رو، از مخلوط‌های آسفالت متخلخل اصلاح‌شده می‌توان به‌طور

of binder and asphalt mixture”, *Advances in Materials Science and Engineering*.

– Behiry, A.E.A.E.M. (2013) “Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures”, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, No. 3, pp. 351-363.

– Camomilla, G., Malgarini, M. and Gervasio, S. (1990) “Sound absorption and winter performance of porous asphalt pavement”, *Transportation Research Record*, Vol. 1265, pp. 1-8.

– Chai, C., Cheng, Y., Zhang, Y., Zhu, B. and Liu, H. (2020) “Mechanical properties of crumb rubber and basalt fiber composite modified porous asphalt concrete with steel slag as aggregate”, *Polymers*, Vol. 12, No. 11, pp. 2552.

– Cetin, A. (2013) “Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures”, *International Journal of Polymer Science*.

– Chu, L., Fwa, T.F. and Tan, K.H. (2017) “Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 141, pp. 402-409.

– Eskandarsefat, S., Dondi, G. and Sangiorgi, C. (2019) “Recycled and rubberized SMA modified mixtures: A comparison between polymer modified bitumen and modified fibres”, *Construction and Building Materials*, Vol. 202, pp. 681-691.

– Frigio, F. and Canestrari, F. (2018) “Characterisation of warm recycled porous asphalt mixtures prepared with different WMA additives”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 82-98.

– AASHTO, T. 283. (2014) “Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage”. American association of state highway and transportation officials (AASHTO), Washington, DC.

– Arrieta, V.S. and Maquilón, J.E.C. (2014) “Resistance to degradation or cohesion loss in Cantabro test on specimens of porous asphalt friction courses”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 162, pp. 290-299.

– ASTM D7064/D7064M. (2013) “Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design”.

– ASTM D4867. (2014) “Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures”.

– ASTM D6390. (2017) “Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures”.

– ASTM E303-93. (2018) “Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester”.

– ASTM E965-15. (2019) “Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique”.

– ASTM E1050/E1050M. (2019) “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”.

– Ameri, M., Vamegh, M., Rooholamini, H. and Haddadi, F. (2018) “Investigating effects of nano/SBR polymer on rutting performance



- Razzaq Abdullah, W. A. (2020) “Quantifying the relationship between skid resistance and crashes for Iowa roadways: A framework for a skid resistance policy”.
- Ruiz, A., Alberola, R., Perez, F. and Sanchez, B. (1990) “Porous asphalt mixtures in Spain”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 87-94.
- Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C. and Dondi, G. (2017) “A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt”, *Construction and Building Materials*, Vol. 132, pp. 500-507.
- Schaus, L.K. (2007) “Porous asphalt pavement designs: Proactive design for cold climate use (Master's thesis, University of Waterloo)”.
- Shirini, B. and Imaninasab, R. (2016) “Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 107, pp. 165-171.
- Van der Zwan, J.T., Goeman, T., Gruis, H.J.A.J., Swart, J.H. and Oldenburger, R.H. (1990) “Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: State of the art review”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 95-110.
- Wang, H., Ding, Y., Liao, G. and Ai, C. (2016) “Modeling and optimization of acoustic absorption for porous asphalt concrete”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 142, No. 4, pp. 04016002.
- Xiao, F. and Amirkhanian, S.N. (2010) “Effects of liquid antistrip additives on
- Gupta, A., Rodriguez-Hernandez, J. and Castro-Fresno, D. (2019) “Incorporation of additives and fibers in porous asphalt mixtures: A review. *Materials*”, Vol. 12, No. 19, pp. 3156.
- Haas, R., Hudson, W.R. and Zaniewski, J.P. (1994) “Modern pavement management”, Florida: Krieger Press.
- Lay, M.G. (2009) “Handbook of Road Technology”, Fourth ed. London and New York: Spon Press.
- Liu, Q., Yu, W., Schlangen, E. and van Bochove, G. (2014) “Unravelling porous asphalt concrete with induction heating”, *Construction and Building Materials*, Vol. 71, pp. 152-157.
- Mallick, R.B., Kandhal, P.S., Cooley Jr, L.A. and Watson, D.E. (2000) “Design, construction, and performance of new-generation open-graded friction courses”, NCAT Report No. 2001-01.
- Nazarinasab, A., Ghasemi, M. and Marandi, S.M. (2018) “Performance Improvement of Porous Asphalt Mixtures using Crumb Rubber and Steel Slag Powder”, *International Journal of Transportation Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 99-110.
- Nielsen, C.B. (2006) “Durability of porous asphalt”, *International experience. DRI Technical Note*, 41.
- Praticò, F.G., Briante, P.G., Colicchio, G. and Fedele, R., (2021) “An experimental method to design porous asphalts to account for surface requirements”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Vol. 8, No. 3, pp.439-452.

rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 9, pp. 1649-1655.

– Xie, Z. and Shen, J. (2016) “Performance of porous European mix (PEM) pavements added with crumb rubbers in dry process”, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 637-646.

– Yang, J. and Yin, C. (2009) “Laboratory study of porous asphalt mixture made with rubber bitumen”, *Asphalt Material Characterization, Accelerated Testing and Highway Management*, Vol. 190, pp. 22-31.

– Yu, B., Jiao, L., Ni, F. and Yang, J. (2015) “Long-term field performance of porous asphalt pavement in China”, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, No. 1, pp. 214-226.

– Zhang, L., Fwa, T.F., Ong, G.P. and Chu, L. (2016) “Analysing effect of roadway width on skid resistance of porous pavement”, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-14.

– Zhang, H., Li, H., Zhang, Y., Wang, D., Harvey, J. and Wang, H. (2018) “Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler”, *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 707-713.

## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سطحی آسفالت متخلخل پلیمری حاوی پودر لاستیک

محسن عموزاده عمرانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه مازندران و درجه کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. سپس موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، تکنولوژی قیر و آسفالت، روسازی بتنی و ترافیک است و در حال حاضر، عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی مازندران می‌باشد.



امیر ایزدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. سپس موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، تکنولوژی قیر و آسفالت، روسازی بتنی و ترافیک است و در حال حاضر، عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه غیر انتفاعی شمال می‌باشد.



قرشید جعفرزاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر و درجه کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه غیر انتفاعی شمال اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان، روسازی آسفالتی است و در حال حاضر، مدرس کانون مهندسين و فعال در حوزه ساختمان می‌باشد.

