

بررسی خواص مدول الاستیسیته و جذب صوت آسفالت نیمه‌گرم حاوی فیلرهای رسانای حرارت - الکتریسیته با استفاده از امواج التراسونیک

سجاد جوادی*، دکتری راه و ترابری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
سعید احمدی، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، وزارت راه و شهرسازی، تهران
رضا اسمعیلی، مهندس عمران، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، وزارت راه و شهرسازی، تهران

Email: sajadjavadi2012@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

چکیده

امروزه، در تحقیقات محققان، استفاده از مواد دورریختنی و با قابلیت انتقال حرارت در آسفالت‌های مختلف، به‌خصوص آسفالت نیمه‌گرم (به سبب فواید محیط‌زیستی)، مد نظر قرار گرفته است. مدول الاستیسیته در تشخیص کارایی آسفالت بسیار مهم است که با روش‌های مختلف به‌دست می‌آید. در این مقاله، استفاده از روش التراسونیک جهت به‌دست آوردن مدول طولی و پیش‌بینی روند مدول الاستیسیته نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی فیلرهای هادی گرما - الکتریسیته در نظر گرفته شده است. همچنین، به بررسی جذب صوت این نوع آسفالت‌ها با استفاده از امواج التراسونیک پرداخته شده است. در این تحقیق، نمونه‌های آسفالتی حاوی فیلرهای سرباره روی، سرباره آهن، لجن کانورتور، سرباره مس و فیلر کاهنده مقاومت الکتریکی زمین، هر کدام با ۳۵٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین وزنی فیلر آهکی (عادی) در آسفالت می‌باشند. از طریق آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای (SCB)، میزان مدول الاستیسیته به‌دست آمد و سپس روی نمونه‌های مارشال با استفاده از روش زیرآبی و با استفاده از امواج التراسونیک، مقدار مدول طولی و همچنین میزان جذب صوت نمونه‌ها ارزیابی شد. نتایج، نشان‌دهنده این واقعیت است که به‌طور میانگین، مخلوط‌های حاوی BOF، سرباره آهن، GIM و سرباره مس، به ترتیب به میزان ۷، ۴، ۲۰ و ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد، امیدانس بیشتری دارند. همچنین، مدول طولی به‌دست آمده با روش امواج التراسونیک برای نمونه‌ها همان روند مدول الاستیسیته با روش خمش سه‌نقطه‌ای را داراست. همچنین، نتایج نشان داد که از نظر آماری اگرچه نوع فیلر بر عملکرد مدول طولی مؤثر می‌باشد ولی درصد فیلر هادی گرما (جانشین فیلر آهکی) بر عملکرد آسفالت مؤثر نیست.

واژه‌های کلیدی: مدول الاستیسیته، آسفالت نیمه‌گرم، فیلرهای رسانا، امواج التراسونیک، جذب صوت.

۱. مقدمه

گرفته شود. مدول برجهنگی را می توان به دو روش مخرب و غیرمخرب تعیین نمود. روش مخرب دارای مزیتی برای تشویق طراحی محافظه کارانه است و همچنین توانایی تولید داده های گسترده و بزرگ را دارد. با این حال، در این روش، مدت زمان انجام آزمایش طولانی بوده تا اجزای مخلوط (ماستیک چسب) به طور کامل بازیابی و آزمایش شود. بنابراین، تعداد آزمایش هایی که باید در یک بازه زمانی انجام شوند محدود می شود. چنین روشی برای کنترل کیفیت روزانه روسازی و تضمین کیفیت روسازی مناسب نیست. همچنین، هزینه نسبتاً زیادی برای تهیه تجهیزات سنگین مارشال و لوازم جانبی آن جهت انجام آزمایش مورد نیاز است.

امروزه، روش های تشخیصی غیرمخرب به طور فزاینده ای در پایش سلامت سازه روسازی و ارزیابی وضعیت فنی روسازی استفاده می شود. در این روش، کمبودها در آزمایشگاه برطرف شده و تکرارپذیری آزمایش بالا رفته و همچنین عدم قطعیت در آزمایش کاهش می یابد. به طور کلی، در روش غیرمخرب، زمان انجام آزمایش کاهش یافته و هزینه نسبتاً کمتری دارد و دقت آن با ضریب تغییرات ۲٪ تخمین زده می شود. روش التراسونیک، یکی از آزمون هایی است که در ارزیابی وضعیت سازه ای روسازی هنگام سرویس دهی و یا خصوصیات مصالح روسازی روی نمونه های آزمایشگاهی بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. در پژوهشی، پتانسیل عریان شدگی مصالح سنگی با استفاده از یک روش آزمایشگاهی التراسونیک نوین ارزیابی شد. نتایج حاصل از آن با نتایج آزمون مسیر- چرخ نی ناس همبستگی داشت و نتیجه گیری شد که با به کارگیری این روش نوین می توان پتانسیل عریان شدگی آزمون های قرصی شکل صیقلی ساخته شده از سنگدانه های مختلف و قیر با روشی سریع و مقرون به صرفه تعیین نمود (وورین و هارتیکاین، ۲۰۰۱). عربانی و همکاران (۲۰۰۹) روی تأثیر متقابل خصوصیات مخلوط آسفالتی

در توسعه رابطه تنش- کرنش، تخمین پتانسیل ترک خوردگی یا عمر خستگی روسازی با رویکردهای مکانیکی یا مکانیکی-تجربی تحلیلی امکان پذیر است که ورودی های اصلی آن، ویژگی های کشسانی مصالح و هندسه لایه ها (ضخامت) می باشند (عبدالله و همکاران، ۱۹۹۹). خصوصیات مکانیکی آسفالت شامل مقاومت کششی، سفتی (مدول برجهنگی و مدول الاستیک) و خرابی حساسیت رطوبتی متأثر از تأثیر عوامل جوی بوده و این عوامل باید در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شوند. در حقیقت، قبل از معرفی راهنمای طراحی AASHTO در سال ۱۹۸۶، ارزیابی پاسخ پلاستیک مخلوط آسفالتی به بارهای استاتیک تنها با دستگاه مارشال انجام می شد. همچنین، به طور گسترده در طراحی ساختاری روسازی های انعطاف پذیر از دهه ۱۹۶۰ و همچنین مطابق با استاندارد طراحی مخلوط آسفالتی AASHTO در سال های ۱۹۸۶ و ۱۹۹۳ در برنامه عملکرد طولانی مدت روسازی از مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) استفاده شده است (فخری و احمدی، ۲۰۱۷). با این حال، آزمایش های شبیه سازی بار خودرو در مقیاس بزرگ نشان داده که آزمایش های بار استاتیک، تکرارهای دینامیک و بارگذاری مختلف را که واقعاً در روسازی قابل اجرا هستند منعکس نمی کنند و اختلافی بین جابجایی های روسازی در معرض بار استاتیک و بارهای ترافیکی دینامیک وجود دارد (دی نیکولا و همکاران، ۲۰۱۱). شاید بتوان از این واقعیت برای توضیح ادغام مدول ارتجاعی مخلوط آسفالتی در راهنمای فعلی طراحی AASHTO و یا تحلیل های خاص برای روسازی های سازه ای استفاده کرد. بنابراین، مطلوب است تا اثرات تکرارهای بارگذاری ترافیکی، تفاوت دما و شرایط محیطی در تعیین مدول ارتجاعی مخلوط آسفالتی جهت تحلیل واقعی یک روسازی انعطاف پذیر در نظر

گرم و امواج التراسونیک مطالعه کردند و نتیجه‌گیری کردند که افزایش میزان فیلر مخلوط موجب افزایش مدول یانگ می‌شود. همچنین، نتایج آزمون التراسونیک به روش تراکم نمونه بستگی دارد. نتایج مدول سختی کششی غیرمستقیم نیز با مدول یانگ مطابقت داشت. لارچر و همکاران (۲۰۱۵) با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج و ضریب میرایی در مخلوط‌های آسفالتی در فرکانس ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز در بازه دمایی ۲۰- تا ۴۰ درجه سلسیوس، به دنبال بررسی تغییرات مدول مختلط مخلوط‌های آسفالتی بودند. نتایج مدول‌های مختلط اندازه‌گیری شده با آزمون دینامیک استاندارد همخوانی داشت. همچنین، تأکید کردند که روش التراسونیک در تحلیل مشخصه‌های مخلوط آسفالتی نتایج خیره‌کننده‌ای داشت. جیانگ و همکاران (۲۰۰۶) تأکید کردند که روش‌های غیرمخرب مبتنی بر امواج التراسونیک را می‌توان در زمره مؤثرترین و اقتصادی‌ترین آزمایش‌های ارزیابی خصوصیات مصالح برشمرده، هر چند تخمین دقیق پارامترهای مقاومت مصالح به دلیل تأثیر متغیرهای مختلف مخلوط در رابطه مقاومت- سرعت موج محدود شده است. نتایج نشان داد که همبستگی بسیار خوبی میان دامنه موج و تعداد دوران تراکم ژیراتوری وجود دارد؛ در حالی که همبستگی با دانسیته مخلوط متوسط است. میرایی امواج التراسونیک با افزایش دوران تراکم ژیراتوری، صرف نظر از دانسیته مخلوط، کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، وجود چسبندگی قوی بین مصالح سنگی و قیر متضمن یکنواختی محیط انتقال موج بوده، و میزان میرایی را کمینه می‌کند. وجود همبستگی زیاد میان مدول دینامیک مخلوط و دامنه موج، نشان‌دهنده قابلیت استفاده از امواج التراسونیک در کنترل کیفیت و تضمین کیفیت روسازی آسفالتی در حین سرویس‌دهی خواهد بود. در مطالعه سزتوکیویچ (۱۹۹۱) زمان انتشار امواج التراسونیک طولی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس از نمونه‌های مارشال ساخته شده از مصالح سنگی شکسته بازالتی،

قیر و فیلر آهکی یکسان اندازه‌گیری شد. نتایج مطالعه روی قابلیت‌های استفاده از روش‌های التراسونیک در مخلوط‌های آسفالتی تأکید کرد که سرعت انتشار امواج طولی التراسونیک وابسته به دانه‌بندی، فیلر، قیر، نسبت-های اختلاط، دمای آزمون و پیرشدگی است و از روش-های التراسونیک می‌توان در پایش وضعیت روسازی موجود نیز استفاده کرد. در تحقیقی که توسط وانگ و همکاران (۲۰۲۲) صورت گرفت، به تغییرات ویسکوزیته قیر با توجه به تغییرات مالتن قیر و بر مبنای خواص ویسکوزیته- دمای قیر با استفاده از امواج التراسونیک پرداخته شد. نتایج نشان داد که روی اجزای سبک و سنگین قیر با استفاده از امواج التراسونیک تغییراتی ایجاد شده و در واقع روشی جدید برای ایجاد آسفالت نیمه‌گرم ابداع گردید. تیگدمیر و همکاران (۲۰۰۴) روی تخمین عمر خستگی مخلوط آسفالتی با استفاده از امواج التراسونیک و بارگذاری نیمه‌سینوسی متناوب خستگی کششی غیرمستقیم آزمون‌ها متمرکز شدند. نمونه‌های آسفالتی با مصالح سنگی آهکی و قیر ۶۰/۷۰ به روش مارشال آماده شدند. بر اساس مدل‌های توسعه یافته، امکان پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط آسفالتی فراهم شد. در مطالعه هول و آرنود (۲۰۰۹) مدول مخلوط آسفالتی با روش آزمون خستگی پنج‌نقطه‌ای و التراسونیک اندازه‌گیری شد. مدول الاستیک مخلوط بین ۲۶ تا ۳۰ گیگاپاسکال تخمین زده شد. نتایج حاصل از روش خستگی پنج‌نقطه‌ای و التراسونیک مشابه بود. ون‌ولسور و همکاران (۲۰۱۱) مدول مختلط مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با دو نوع درصد فضای خالی مختلف و در چهار دمای مختلف را به روش دینامیک کشش غیرمستقیم و امواج التراسونیک اندازه‌گیری کرده و نتیجه‌گیری کردند که مدول تخمین زده شده با روش التراسونیک در مخلوط‌های آسفالتی با درصد فضای خالی کمتر به مدول دینامیک نزدیک‌تر است و هر چه درصد فضای خالی مخلوط بیشتر شود میزان اختلاف بیشتر

قیرهای کوتاه مدت پیرشده و بلندمدت پیرشده مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که سرعت امواج التراسونیک عبوری از نمونه قیری با افزایش دمای آزمون کاهش می-یابد. سرعت امواج التراسونیک در قیرهای اصلاح شده کمتر از قیر خالص بود. این محققین پیشنهاد دادند برای اندازه گیری مدول برشی بهتر است از روش تماسی استفاده شود.

تولید مصالح سنگی در معادن و استفاده از مصالح بکر در ساخت، تعمیر و نگهداری راه‌ها و زیرساخت‌های آنها همواره با چالش‌های زیست‌محیطی زیادی همراه است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۷ میلادی، تنها در اتحادیه اروپا، ۲۸۶۱ میلیون تن مصالح سنگی استحصال شد و حدود ۸ درصد آن در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. از سوی دیگر، امروزه در ساخت بزرگراه‌ها از مصالح دورریختنی مختلف به صورت گسترده استفاده می‌شود (پرز و همکاران، ۲۰۱۱).. به طوری که استفاده از سرباره‌های فلزات در آسفالت به جهت ارزانی و همچنین مقاومت زیاد آنها مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این راستا، خلاصه‌ای از مطالعات متعدد اخیر در مورد اثرات انواع مختلف سرباره (سرباره کوره قوس الکتریک (EAF)، سرباره BOF، سرباره روی، سرباره مس) بر مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

خواهد شد. ماجهی و همکاران (۲۰۱۷) مدول دینامیک مخلوط آسفالتی را با استفاده از روش دینامیک و روش التراسونیک اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان از تأثیر به-سزای چگالی نمونه‌های آسفالتی روی خواص الاستیسیته مخلوط‌ها داشت. در مطالعه دوترتر و همکاران (۲۰۲۲) در جهت به دست آوردن مدول دینامیک، از امواج التراسونیک و افت و خیزسنج وزنی سبک روی دال آسفالتی و مقایسه آنها با حالت آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی استفاده شد که نتایج نشان‌دهنده این است که هر دو روند مشابهی داشته و می‌توان از آنها برای پیش‌بینی مدول دینامیک استفاده کرد. در پژوهش هو و همکاران (۲۰۲۲) نیز به بررسی زاویه فاز، مدول دینامیک و خواص آکوستیک انواع مخلوط‌های آسفالتی با چگالی و فضای خالی متفاوت با استفاده از امواج التراسونیک پرداخته شده و در نتیجه مدلی جهت پیش‌بینی مدول دینامیک ارائه گردید. نورامبوئنا کنتراس و همکاران (۲۰۱۰) مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی با دانسیته و فضای خالی مختلف را با استفاده از امواج التراسونیک تماسی اندازه‌گیری کردند و نتیجه‌گیری کردند که با افزایش فرکانس امواج التراسونیک مدول الاستیسیته مخلوط تخمین زده شده بیشتر خواهد شد. خلیلی و کاراکوزیان (۲۰۱۵) در باره امکان‌سنجی استفاده از امواج التراسونیک با فرکانس بالا در تعیین طبقه‌بندی PG قیرهای خالص،

جدول ۱. مروری بر مشخصات عملکردی آسفالتی مختلف

Authors	Year	Additives				Asphalt mixture type	Results
		EAF	BOF	Zinc slag	Copper slag		
Motevalizadeh et al.	2020	*				HMA and WMA	درشت‌دانه EAF موجب افزایش مقاومت شروع ترک‌خوردگی آسفالت می‌شود و همچنین EAF فیبری موجب بهبود مقاومت چسبندگی ماستیک قیری می‌شود
Fakhri et al.	2020				*	WMA	Copper slag در مخلوط سبب کاهش پتانسیل شیارشدگی و افزایش

						قابلیت انتقال حرارت و توانایی ترمیم ترک می‌شود
Fakhri et al.	2022			*	WMA	فیلر سرباره روی سبب ایجاد پتانسیل خودترمیمی در آسفالت نیمه گرم شده و تا حدی سبب بهبود خواص مکانیکی آسفالت نیمه گرم می‌شود
Rodríguez-Fernández et al.	2021	*	*		HMA	جایگزین کردن سرباره‌های EAF و BOF با مصالح سنگی درشت‌دانه مخلوط آسفالتی سبب افزایش مقاومت خزشی و کاهش حساسیت رطوبتی می‌شود
Modarres & Alinia Bengar	2019				HMA	جایگزینی فیلر سرباره مس با فیلر مصالح سنگی موجب افزایش مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت خستگی می‌شود
Aktaş and Aslan	2016			*	SMA	فیلر سرباره روی سبب افزایش مقاومت مارشال و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت می‌شود
Abdelfattah et al.	2018				HMA	با افزودن Copper slag به صورت ریزدانه به آسفالت، پتانسیل شیارافتادگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد
Behnood et al.	2015				HMA	سرباره مس نسبت به سنگدانه بتنی بازیافتی و سنگدانه آهکی قفل و بست بهتر و همچنین خواص مکانیکی بهتری در مخلوط آسفالتی ایجاد می‌کند
Liapis and Likoydis	2012	*			HMA	EAF در آسفالت سبب بهبود بافت ماکرو مخلوط و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ضربه می‌شود

همکاران، ۲۰۱۹). جذب صوت در اثر استهلاک انرژی صوتی به صورت انرژی گرمایی پدیدار می‌شود. از جمله علل اصلی استهلاک انرژی صوتی می‌توان به ارتعاشات خمشی در نمونه و یا انعکاس چندگانه امواج صوتی در

در مصالح همگن و ایزوتروپیک، عملکرد صوتی با مجموعه‌ای از ثابت‌های آزمایشگاهی نظیر ضریب جذب، ضریب انعکاس، مقاومت آکوستیک، ثابت انتشار و ضریب کاهش صوت یا NRC تعریف می‌شود (کروز و

آنکه خواص گوناگون جذب صوت و مدول الاستیسیته این نوع آسفالت مدنظر قرار گرفت. همچنین، می توان بیان نمود که فیلرهای سرباره ای معمولاً دارای فضای خالی بیشتری نسبت به فیلر آهکی عادی می باشد که این عامل سبب افزایش جذب صوت می شود و از طرفی وجود عناصر مختلف در این نوع فیلرها می تواند بر خواص جذب صوت مخلوط تأثیر گذاشته که تاکنون مدنظر قرار نگرفته است.

بنابراین، در این پژوهش، اثرات انواع مختلف سرباره و درصدهای متفاوت آنها در آسفالت نیمه گرم جهت دستیابی به اهداف زیر بررسی شد:

- تعیین مدول الاستیسیته مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی فیلر رسانا با استفاده از روش مخرب
- تعیین مدول طولی مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی فیلر رسانا به روش غیرمخرب
- تعیین امپدانس صوتی مخلوطهای نیمه گرم حاوی فیلر رسانا با استفاده از آزمایش امواج التراسونیک
- تعیین تأثیر نوع و میزان فیلرهای مختلف رسانا بر امپدانس صوتی و مدول الاستیسیته مخلوط آسفالتی نیمه گرم

۲. مواد، مصالح و آزمایش ها

۲-۱. مصالح

۲-۱-۱. قیر

قیر استفاده شده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ از شرکت نفت جی است. این قیر برای تهیه نمونه های مخلوط آسفالتی نیمه گرم مورد استفاده قرار گرفته که خصوصیات آن در جدول ۲ آمده است.

خلل و فرج موجود در آن اشاره نمود (آلبر و همکاران، ۲۰۱۸). در مصالح متخلخل که دارای منافذ به هم پیوسته ای هستند، انرژی صوتی ورودی درون خلل و فرج جسم انعکاس یافته، منافذ را مرتعش کرده، سبب تبدیل انرژی صوتی به گرما می شود. بیلگیری و کالوش (۲۰۰۹) در پژوهشی، ضریب جذب صوت مصالح روسازی با امواج التراسونیک را پیش بینی نمودند. بر اساس مطالعات، میزان سر و صدای^۱ صوتی روسازی تابع پارامترهایی مانند بافت روسازی، اصطکاک روسازی، نوع و خصوصیات روسازی، عمر روسازی، ضخامت لایه روسازی، تخلخل لایه، جذب صوت یا امپدانس آکوستیک است. در مخلوطهای آسفالتی فرض بر آن است که فضای خالی مخلوط، مصالح سنگی، قیر خالص، افزودنی های مخلوط و خصوصیات ویسکو-الاستیک مخلوط نقش به سزایی در میزان سر و صدای تیر عبوری از سطح روسازی دارند؛ هر چند هر کدام از اجزای سازنده مخلوط آسفالتی در سر و صدای ایجاد شده در دست تحقیق و بررسی است. در حال حاضر، روش استاندارد اندازه گیری جذب صوت یا امپدانس صوتی آزمایشگاهی بر اساس استاندارد ASTM E 1050 می باشد (بیلگیری و وی، ۲۰۱۴).

مطالعات بی شماری در خصوص مشخصات عملکردی مخلوطهای آسفالتی حاوی انواع مختلف سرباره انجام شده است. این در حالی است که تاکنون مطالعه ای در خصوص تعیین مدول الاستیسیته مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی سرباره با استفاده از روش های مخرب و غیرمخرب انجام نشده است؛ در حقیقت، باید گفت که در تحقیقات مختلف، بر خواص انواع آسفالت با استفاده از امواج التراسونیک تمرکز شده، ولی همچنان در آسفالت نیمه گرم به این مسئله توجه نشده است؛ حال

^۱ - Noise

جدول ۲. خصوصیات قیر مورد استفاده

واحد	روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات قیر
کیلوگرم بر متر مکعب	ASTM D3289	۱۰۱۷	وزن مخصوص در ۲۵ °C
دهم میلی متر	AASHTO T49	۶۵	درجه نفوذ در ۲۵ °C
درجه سلسیوس	ASTM D36	۴۹/۸	نقطه نرمی
سانتی متر	ASTM D113	بیشتر از ۱۰۰	انگمی در ۲۵ °C
درجه سلسیوس	ASTM D92	۳۳۴	نقطه اشتعال

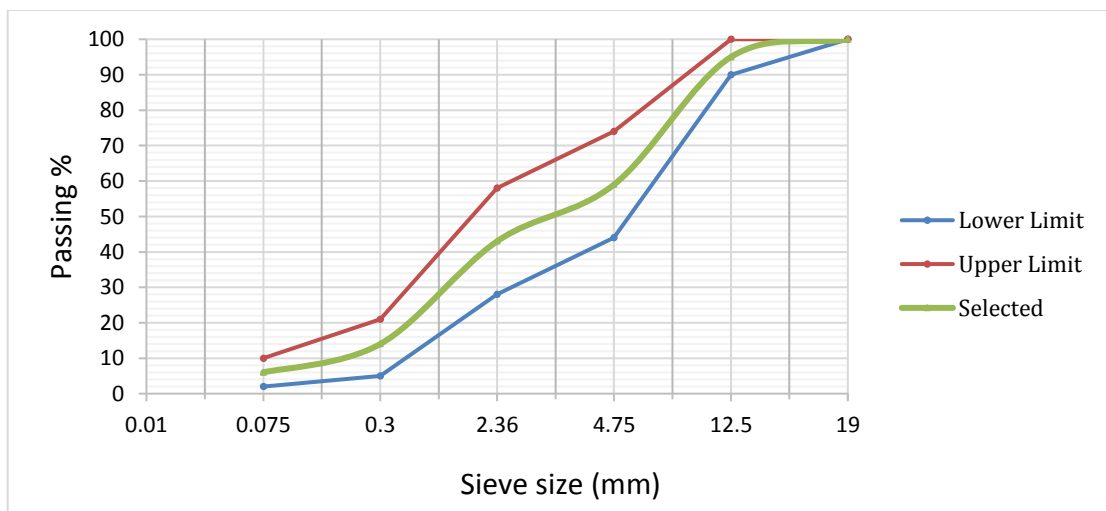
۲-۱-۲. سنگدانه

دانه‌بندی مصرفی (برای آستر و رویه) برای ساخت نمونه‌ها و درصد عبوری از هر الک برای حالت پایه بر مبنای آیین‌نامه ۲۳۴ ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی هستند که خواص فیزیکی آنها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

واحد	آزمایش	نتایج آزمایش	شرح
درصد	AASHTO T96	۲۲/۳	آزمایش سایش لس آنجلس
درصد	BS 812	۱۶	حداکثر ضریب تورق
درصد	ASTM D5821	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴
درصد	AASHTO T85	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
درصد	AASHTO T84	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM C127	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت‌دانه
گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM C128	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم

۲-۱-۳. فیلر

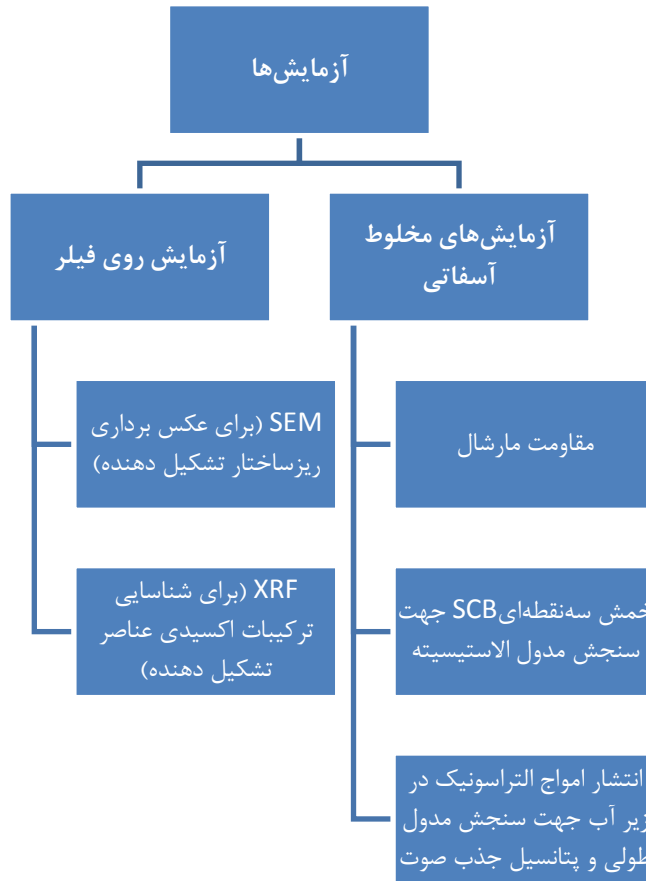
استفاده شده است که این مقادیر بر مبنای تحقیق نیون و خبیری (۲۰۱۶) بوده است. در این تحقیق، مواد دورریختنی صنعتی انتقال دهنده حرارت به عنوان فیلر جایگزین بخشی از فیلر آهکی (فیلر پایه) و یا جایگزین همه آن استفاده شده است. در ادامه و در جدول ۴، مشخصات فیزیکی و دانه بندی فیلهای رسانای به کار رفته در این تحقیق مدنظر قرار می گیرد.

در این تحقیق، از فیلر سرباره روی، فیلر سرباره آهن، فیلر سرباره مس، فیلر لجن کانورتور و فیلر کاهنده مقاومت الکتریکی زمین (GIM) (در جاهایی که نیاز است که مقاومت الکتریکی زمین کاهش یابد از این مواد استفاده می شود) به صورت وزنی و به عنوان جایگزین وزنی فیلر آهکی در مخلوط به میزان ۳۵٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی فیلهای به کار برده شده در تحقیق

نام فیلر	علامت اختصاری	خصوصیات فیزیکی	دانه بندی	تصویر
فیلر اسلگ روی	Zn	چگالی: ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب شکل ذرات سازنده: کروی درصد جذب آب: ۰/۸٪	(درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی متر: ۱۰۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۴ میلی متر: ۷۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۱ میلی متر: ۳۰٪)	
فیلر لجن کانورتور	BOF	چگالی: ۳/۱ گرم بر سانتی متر مکعب شکل ذرات سازنده: کروی درصد جذب آب: ۱/۲٪	(درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی متر: ۱۰۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۴ میلی متر: ۶۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۱ میلی متر: ۴۱٪)	
فیلر کاهنده مقاومت الکتریکی زمین	GIM	چگالی: ۲/۷ گرم بر سانتی متر مکعب شکل ذرات سازنده: کروی درصد جذب آب: ۲٪	(درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی متر: ۱۰۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۴ میلی متر: ۳۵٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۱ میلی متر: ۱۰٪)	
فیلر سرباره فولاد	St	چگالی: ۳/۵۱ گرم بر سانتی متر مکعب شکل ذرات سازنده: تیز گوشه با حفرات زیاد درصد جذب آب: ۱/۳٪	(درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی متر: ۱۰۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۴ میلی متر: ۵۲٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۱ میلی متر: ۳۷٪)	
فیلر سرباره مس	Cp	چگالی: ۲/۷ گرم بر سانتی متر مکعب شکل ذرات سازنده: کروی درصد جذب آب: ۰/۷٪	(درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی متر: ۱۰۰٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۴ میلی متر: ۷۴٪) (درصد عبوری از الک ۰/۰۱ میلی متر: ۵۵٪)	

در شکل ۲، فلوجارت آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق ارائه شده است.



شکل ۲. فلوجارت خلاصه آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق

۲-۲. ساخت نمونه

بر مبنای تحقیق وایکوس و همکاران (۲۰۱۶)، برای جلوگیری از کاهش شدید مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی دمای کم، نباید بیش از ۲٪ (بر حسب وزن قیر) ساسوبیت به مخلوط آسفالت اضافه شود. لذا، بر مبنای تحقیق فخری و همکاران (۲۰۲۲) جهت ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم در این تحقیق از ۱/۵ درصد وزنی قیر ساسوبیت استفاده شد. در این تحقیق، ابتدا فرآیند طراحی اختلاط مارشال بر مبنای AASHTO T245 برای تعیین قیر بهینه برای درصد‌های مختلف فیلرهای سرباره روی، سرباره آهن، سرباره مس و لجن کانورتور اجرا شده است و سپس آزمایش‌ها روی نمونه‌ها انجام گرفت. در این تحقیق، جهت انجام آزمایش از هر

نمونه سه عدد ساخته شد. برای ساخت نمونه مارشال در دمای ۱۲۵ تا ۱۳۵ درجه مخلوط ساخته شده ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه آسفالتی زده شد. میزان فضای تخلخل نمونه‌ها نیز $\pm 0.3/4$ درصد می‌باشد و مشخصات قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی در جدول ۵ ارائه شده است. بر مبنای جدول ۵ و به خصوص در مورد افزایش درصد قیر بهینه با افزایش درصد جانشینی فیلر سرباره‌ای با فیلر آهنی، می‌توان گفت که بیشتر بودن فضای خالی فیلر سرباره‌ای نسبت به فیلر عادی آهنی سبب افزایش درصد قیر بهینه در مخلوط‌های حاوی فیلر سرباره‌ای می‌شود و به همین دلیل با افزایش درصد فیلر سرباره‌ای، میزان قیر بهینه افزایش می‌یابد. در مورد وزن مخصوص ظاهری هم باید گفت که چگالی نسبت وزن به حجم بوده که اگرچه

به دلیل وجود فلز در برخی فیلهای سرباره‌ای، این نوع فیله‌ها وزن بیشتری نسبت به فیله عادی دارند ولی از طرفی به دلیل وجود فضای خالی بیشتر دارای حجم بسیار بیشتری نسبت به فیله عادی بوده و لذا چگالی آن فیله و در نهایت چگالی مخلوط حاوی فیله مذکور کاهش می‌یابد.

جدول ۵. مشخصات قیر بهینه (مشخصات مارشال) مخلوط‌های آسفالتی این تحقیق

نوع مخلوط	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	مقاومت مارشال (کیلو نیوتن)	روانی (میلی متر)	VMA	VFA	میزان قیر بهینه (%)
Normal (WMA)	2.33	9.60	3.2	14.9	73.1	5.2
Zn 35	2.32	10.96	3.2	15.0	73.3	5.3
Zn 70	2.31	11.76	3.5	15.1	73.5	5.4
Zn 100	2.29	11.25	3.7	15.2	73.7	5.5
St 35	2.34	13.67	3.0	15.0	73.3	5.6
St 70	2.35	13.80	3.1	15.1	73.5	5.7
St 100	2.38	13.95	3.1	15.2	73.7	5.8
Cp 35	2.28	11.23	3.0	15.0	73.3	5.4
Cp 70	2.40	11.09	3.1	15.1	73.5	5.5
Cp 100	2.35	10.31	3.5	15.1	73.5	5.6
BOF 35	2.35	10.96	2.7	15.1	73.5	5.3
BOF 70	2.38	11.10	3.7	15.2	73.7	5.5
BOF 100	2.41	11.36	3.3	15.2	73.7	5.7
GIM 35	2.31	12.53	3.1	15.0	73.5	5.2
GIM 70	2.35	12.96	3.2	15.1	73.6	5.1
GIM 100	2.24	12.83	3.5	15.2	73.7	5.0

۲-۳. آزمایش امواج X-ray

برای اولین بار، هامبلین در سال ۱۹۶۲ در مطالعه پرتوگرافی سنگ‌های رسوبی از پرتو ایکس استفاده کرد و پس از آن روش پراش پرتوی X در گرایش‌های مختلف مهندسی عمران به منظور تعیین ترکیب شیمیایی مصالح سنگی و فیله‌ها استفاده شده است (وو و همکاران، ۲۰۱۷). روش XRF^۱ یک روش تحلیلی است که برای تجزیه و تحلیل ساختاری یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه به کار می‌رود. این روش، بر ارزیابی برهم‌کنش بین یک منبع برانگیختگی پرتو ایکس و نمونه آزمایش متکی

بعد از شناخت قیر، سنگدانه و فیله‌های به کار رفته در ساخت مخلوط نیمه گرم و همچنین روش ساخت نمونه‌ها، به معرفی آزمایش‌های انجام گرفته اشاره می‌شود. ابتدا به آزمایش‌های XRF و SEM جهت بررسی اجزا و ریخت‌شناسی مصالح، آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای جهت یافتن مدول الاستیسیته و سپس آزمایش التراسونیک زیر آب برای یافتن روند مدول خطی بر مبنای روش غیرمخرب و یافتن امپدانس مخلوط‌های آسفالتی اشاره می‌شود.

^۱ X-ray fluorescence

تشخیص ترکیبات اکسیدی عناصر فیلرهای به کار برده شده در این تحقیق، از XRF استفاده شده تا ترکیب اکسیدی عناصر مشخص شود که در جدول ۶ آمده است.

است. قابلیت‌های توصیفی این روش به طور کلی بر این اصل کلی استوار است که هر عنصر دارای یک ساختار اتمی منحصر به فرد است که مجموعه منحصر به فردی از قله‌ها^۱ را در طیف پرتو ایکس آشکار می‌سازد. جهت

جدول ۶. نتایج XRF ترکیب عنصری فیلر آهک، فیلر سرباره روی، فیلر سرباره آهن، فیلر سرباره مس و فیلر لجن کانورتور

L.O.I	CuO	ZnO	K ₂ O	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	ترکیب اکسیدی
										نوع فیلر
۳۷/۴۷	-	-	۰/۳۹۷	۰/۰۹۸	۰/۷۶۹	۱/۲۰۳	۰/۷۱۴	۱۰/۱۹	۴۹/۰۵	فیلر آهکی
۲۵/۰۸	-	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۲	۰/۱۱	-	۶۶/۶	۰/۷۰	۷/۱۰	فیلر لجن کانورتور
۳۵/۹۲	-	۶۰/۰۵	۱/۲	-	-	-	۱/۸۸	۰/۷۳	۰/۲۲	فیلر سرباره روی
۶/۶	-	-	-	-	۵	-	۲۷	۱۶	۴۰	فیلر سرباره فولاد
۱۳/۶۴	۱/۵۳	-	۰/۹۷	۳/۳	۳/۱۸	۰/۷۲	۴۵/۴۳	۲۴/۱۰	۷/۱۳	فیلر سرباره مس
۸۱/۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۴۶	۳/۶	۰/۶۵	۳/۵۷	۲/۴	۶/۷۶	۰/۸۲	فیلر کاهنده مقاومت الکتریکی Gim

است. در ابتدا و قبل از انجام آزمایش، نمونه‌های SCB جهت شکست ترد (نمونه به سرعت و بدون تغییر در ریزساختار اولیه شکسته می‌شود) تحت دستگاه شکست به مدت ۲۴ ساعت در ۲۰- درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. شکافی با ضخامت دو میلی‌متر و با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر در مرکز پایینی نمونه‌های مورد آزمایش ایجاد می‌شود (شکل ۳). شکاف^۲ ایجاد شده در نمونه‌های آزمون SCB برای جهت‌دهی مسیر بارگذاری عمودی و نقطه آغاز و گسترش ترک‌خوردگی نمونه ایجاد شده است. نمونه‌های نیم‌دایره‌ای روی دو غلتک استوانه‌ای جدا از هم که با فاصله ۸۰ میلی‌متر از هم قرار دارند، جای داده می‌شوند. بار یکنواخت با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه در امتداد شکاف ایجاد شده، درست بالای نقطه میانی نمونه نیم‌دایره‌ای، اعمال می‌شود. دستگاه به بارگذاری ۲۰ کیلو نیوتنی مجهز شده است.

۲-۴. تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM)

SEM بارها در ریخت‌شناسی مصالح سنگی به کار رفته است. از روش SEM در تعیین اندازه، میزان و توزیع کانی‌های رسی، قیر و اجزای مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. هرچند برهم‌کنش میان قیر و مصالح سنگی و ریزدانه‌های فیلر تابع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و قیر بوده، اما با تغییر مصالح سنگی یا قیر تغییر خواهد کرد (وو و همکاران، ۲۰۱۷).

۲-۵. آزمایش خمش سه نقطه‌ای

در این تحقیق (بر مبنای نسبت تنش به کرنش) مدول الاستیسیته مخلوط‌ها با انجام آزمون SCB بر نمونه‌های نیم‌دایره‌ای برش خورده (ضخامت ۲۵ میلی‌متر و قطر ۴ اینچ) در دمای ۲۰- درجه سلسیوس تخمین زده شده

2- Notch

1- Peaks

بررسی خواص مدول الاستیسیته و جذب صوت آسفالت نیمه گرم حاوی فیلرهای رسانای حرارت- الکتریسیته با استفاده از امواج التراسونیک

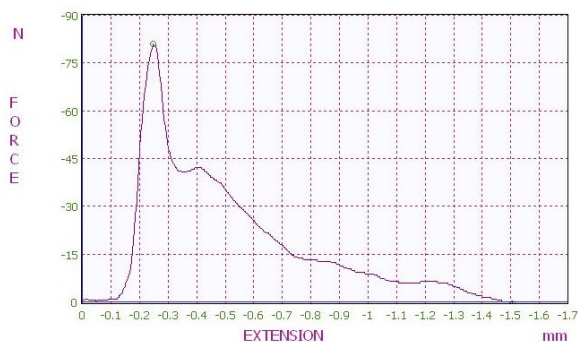
الاستیسیته) را در دمای ۲۰- درجه سلسیوس به دست آورد.

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \quad (1)$$

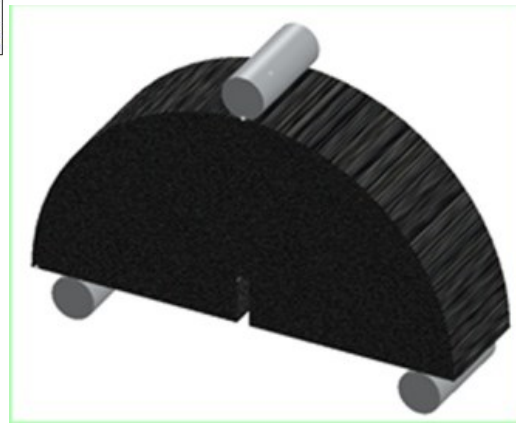
جابجایی و نیروی حاصل از بارگذاری با لودسل نصب شده روی نمونه اندازه گیری می شود. بعد از بارگذاری، با استفاده از رابطه (۱) و بر مبنای شکل ۳- ب می توان شیب نمودار کرنش- تنش در ناحیه الاستیک (مدول

K.N.Toosi University.
Civil Eng.

SANTAM
ENG. DESIGN CO. LTD.
Tel: 66806397, 66814497, 66814498
Fax: 66816581
Tehran-IRAN



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) تصویری از نمودار تست سه نقطه ای و ب) تصویر شکل سه نقطه ای

با توجه به اینکه اگر زمانی در مقابل موج، تغییر محیط انتشار امواج ایجاد شود (به عنوان مثال، ورود موج از آب به نمونه مارشال)، سرعت موج در محیط تغییر می کند. دستگاه روی نمایشگر زمان پرواز امواج (زمان حرکت موج در محیط) را نشان می دهد. در شکل ۶، سیگنال برگشتی از دیواره پشتی مشخص شده است. به دلیل اینکه در ناحیه اغتشاش امواج نمی توان اندازه گیری زمان پرواز از اختلاف بررسی کرد، لذا جهت اندازه گیری زمان پرواز از اختلاف بین سیگنال اول (ورود موج به نمونه مارشال) و سیگنال دوم (خروج موج از نمونه مارشال و ورود به آب در راستای برگشت به بالای ظرف) استفاده می شود.

سیگنال به صورت بک وال اول (موج برگشتی از کف ظرف به انتهای نمونه مارشال برخورد می کند) و دوم (موج برگشتی از کف ظرف از ابتدای نمونه مارشال به محیط بیرون (آب) خارج می شود) از سطح پایین قطعه باید مشخص شود. با توجه به ابعاد نمونه و اینکه پروب غوطه وری است، از سطح نمونه نیز بک والی ایجاد شده

۲-۶. تست غیر مخرب التراسونیک

برای تعیین مدول طولی مخلوط آسفالتی، نمونه های مارشال مطابق شکل های ۴ و ۵ در مخزن محتوی آب تا ارتفاع مشخص، روی پایه غوطه ور شده اند. پایه زیر نمونه برای جداسازی کف ظرف از قطعه تعبیه شده است. در این آزمون، آب نقش ماده واسط را دارد و امواج التراسونیک با فرکانس تقریبی یک مگاهرتز از طریق پروب نصب شده در ارتفاع مشخص از بالای مخزن آب با دمای ۲۰ درجه سلسیوس از نمونه گذر می کنند. بعد از وارد شدن امواج فراصوت در آب بالای نمونه مارشال، امواج به انتهای نمونه مارشال برخورد کرده و به صورت سیگنال روی نمایشگر مشخص می شوند و سپس از نمونه عبور کرده و به کف ظرف آب برخورد کرده و برمی گردند و مجدداً به نمونه مارشال برخورد می کنند و موج برگشتی در نرم افزار ثبت می گردد (شکل های ۴، ۵ و ۶).

$$E_1 = \rho v^2 \quad (3)$$

امپدانس در قطعات را نیز می‌توان از معادله (۴) به دست آورد. این مقدار، مقاومت نمونه در مقابل تغییر را مشخص می‌کند. در این رابطه، Z امپدانس، ρ دانسیته مصالح (kg/m^3) و v سرعت گذر موج طولی التراسونیک از مصالح (m/s) است.

$$Z = \rho v \quad (4)$$

شاخص سنجش میرایی آکوستیک (DAMP) شاخصی است که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. این شاخص بین یک درصد (معرف کمترین میرایی ممکن) تا ۱۰۰ درصد (معرف بیشترین میرایی ممکن) تغییر می‌کند. این شاخص تابع Z یا امپدانس (cgs Rayls) است. با توجه به نسبت معکوس Z و DAMP هرچه امپدانس صوتی لایه‌ای کمتر باشد میزان DAMP، یا جذب صوت آن لایه بیشتر خواهد بود. باید توجه شود که خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی با جذب صوت لایه آسفالتی مرتبط بوده، و اساس تعریف رابطه (۵) است (بیلیگیری و وی، ۲۰۱۴).

$$DAMP (\%) = 100 \cdot \left(\frac{100}{Z}\right)^{0.4} \quad (5)$$

است. این بک وال با توجه به زمان پرواز از بک وال پشت قطعه قابل شناسایی است (شکل ۶).

برای هر تست مشابه نمودار شکل ۶، برای هر قطعه، زمان رفت و برگشت موج مشخص شد. طول قطعات با کمک ابزار کولیس دیجیتال تا سه صدم اعشار اندازه‌گیری شد. بعد از این حالت، با کمک معادلات سرعت خطی می‌توان میزان سرعت صوت را بر مبنای رابطه (۲) در نمونه مشخص کرد.

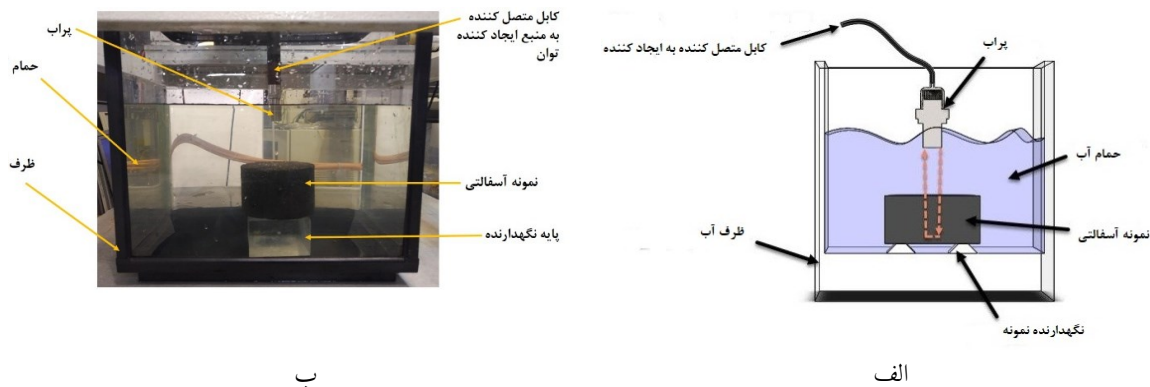
$$v = \frac{2x}{t} \quad (2)$$

که X طول نمونه (میلی‌متر)، t اختلاف زمان موج اول و موج برگشتی (ثانیه) و V سرعت (میلی‌متر بر ثانیه) است. با توجه به عدم عبور امواج عرضی در سیالات غیر لزج همانند آب، سرعت محاسبه شده سرعت انتشار موج طولی در نمونه است (رژ، ۲۰۱۴). با استفاده از رابطه (۳) می‌توان مدول الاستیسیته طولی نمونه‌های آسفالتی را تخمین زد. در این رابطه، ρ چگالی نمونه آسفالتی و V سرعت عبور امواج التراسونیک طولی از درون نمونه آسفالتی است. رابطه (۳) زمانی قابل استفاده است که نمونه محصور نشده باشد و امکان تغییر شکل جانبی داشته باشد (بیلیگیری و کالوش، ۲۰۰۹).

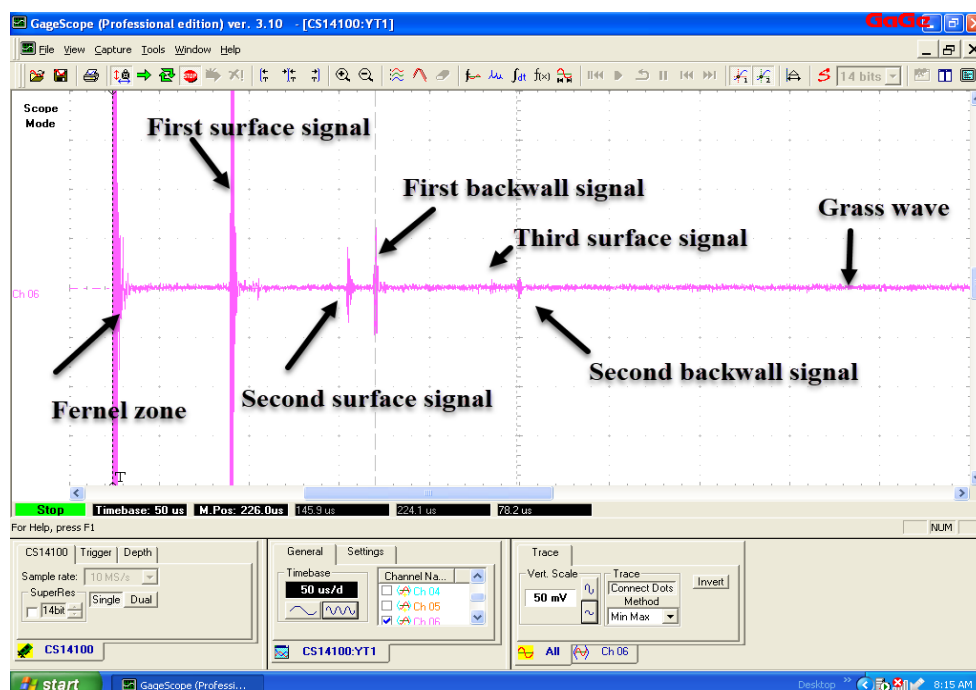


شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری مدول طولی با امواج التراسونیک

بررسی خواص مدول الاستیسیته و جذب صوت آسفالت نیمه گرم حاوی فیلهای رسانای حرارت- الکتریسیته با استفاده از امواج الٹراسونیک



شکل ۵. الف) الگوریتم اندازه گیری و ب) شماتیک الگوریتم اندازه گیری



شکل ۶. سیگنالهای مختلف رفت و برگشتی و اندازه گیری زمان رفت و برگشت در نرم افزار

۳. نتایج

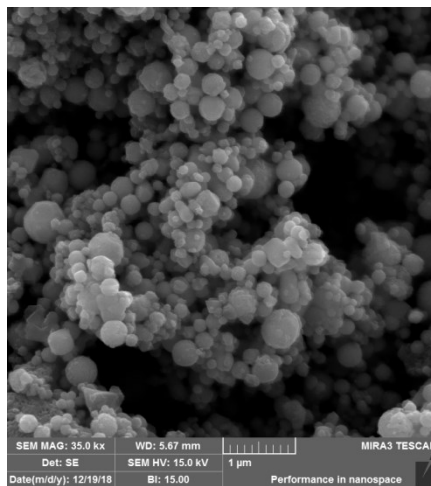
۳-۱. تحلیل SEM نمونه ها

در این مطالعات، به منظور ارزیابی خصوصیات سطحی، اندازه خلل و فرج و ساختار کریستالی فیلهای منتخب، از روش SEM استفاده شد. تصاویر گرفته شده با این روش، در شکل ۷ در مقیاس یک میکرون برای فیلهای جایگزین فیله آهکی نشان داده شده است. بر اساس تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی، سطح تخلخل فیلهای سرباره روی، لجن کانورتور و سرباره

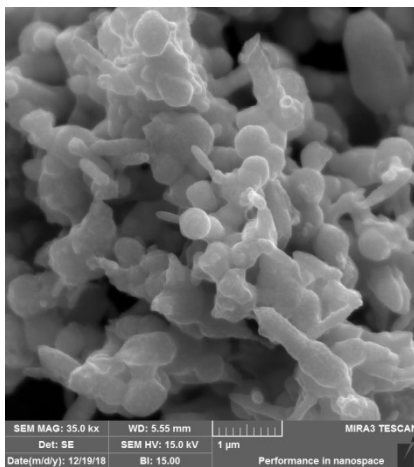
با اندازه گیری مقدار زمان و ارتفاع نمونه، می توان مقدار سرعت صوت را حساب کرد. با به دست آمدن سرعت صوت در نمونه و نیز داشتن چگالی، مقدار مدول الاستیک در راستای مورد نظر (در اینجا مدول طولی) بر مبنای رابطه (۳) به دست خواهد آمد. دلیل افت ناگهانی مقدار دامنه در نمودار مشخص شده، جنس نمونه است. قیر یک ماده با تضعیف موج بالا است (چنگ و همکاران، ۲۰۱۲)، که این خاصیت، اندازه گیری سرعت در اینگونه نمونه ها را دشوار می کند.

و فرج و نیز عناصر و نحوه توزیع آن‌ها در قطعات در جذب صوت و تغییرات رفتاری الاستیک تأثیر دارد. فضاهای خالی و حفره‌ها مانند سدی در مقابل عبور امواج قرار خواهند گرفت. تراکم مواد باعث ایجاد یک مسیر عبور برای حرکت موج خواهد شد. هر قدر ماده متراکم‌تر باشد میزان جذب صوت افزایش خواهد یافت. در شکل ۷، عکس SEM برای فیلرهای رسانای استفاده شده در این تحقیق (دقت یک میکرومتر) ارائه شده است.

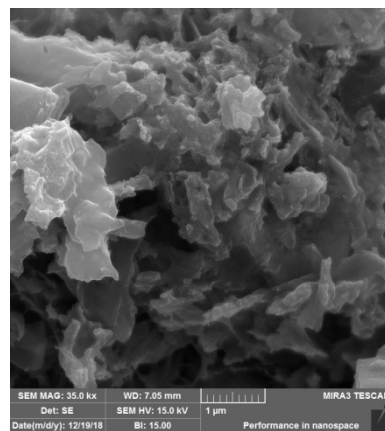
فولاد زیاد بوده، ریخت‌شناسی فیلر GIM نشان‌دهنده ساختار ورقه‌ای با تخلخل کم است و تخلخل سرباره مس نیز اندک است. وجود سطح جانبی متخلخل موجب چسبندگی بهتر قیر به فیلرهای متخلخل می‌شود. از این رو، انتظار می‌رود که دوام رطوبتی مخلوط‌های نیمه‌گرم حاوی فیلرهای سرباره روی، لجن کانورتور و سرباره فولاد بیش از مخلوط‌های نیمه‌گرم حاوی فیلرهای سرباره مس و GIM باشد. همچنین، می‌توان گفت که وجود خلل



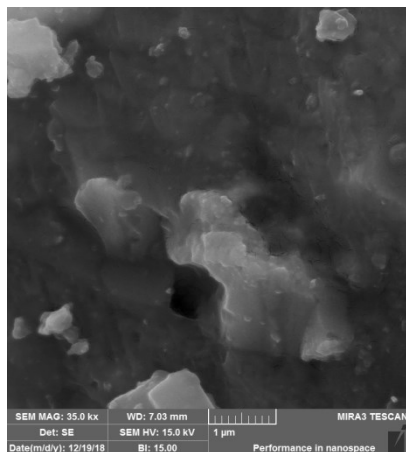
الف. لجن کانورتور یک میکرومتر



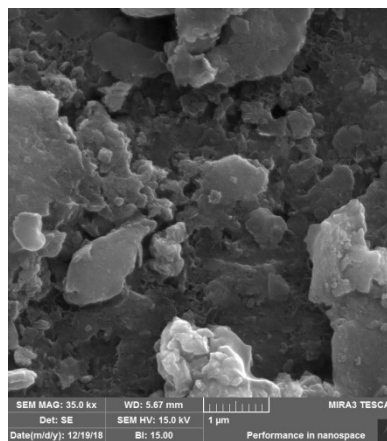
ج. سرباره روی یک میکرون



ب. سرباره فولاد یک میکرون



ه) سرباره مس یک میکرومتر



د) GIM یک میکرومتر

شکل ۷. عکس برداری الکترونی از سطح فیله آهنی و سرباره‌ها

ریزدانه‌های مخلوط بر خواص مکانیکی آن می‌باشد. همچنین، به‌طور کلی، با افزایش درصد فیلهای مختلف در نمونه آسفالتی، مقدار سرعت دارای تغییرات معناداری نبوده، به‌طوری که با افزایش درصد فیلهای در مخلوط آسفالتی سرعت صوت افزایش یافته است. نتایج مدول الاستیسیته برای مخلوط‌های نیمه‌گرم نشان‌دهنده مقادیری بین ۱۲۵۷ تا ۲۳۵۹ مگاپاسکال می‌باشد و مقادیر مدول خطی حاصل از آزمایش التراسونیک در آب بین ۶۵۰۶ تا ۱۳۱۲۰ مگاپاسکال برای فرکانس تقریبی یک مگاهرتز می‌باشد. این نتایج می‌تواند به عنوان مرجعی برای پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیسیته تحت فرکانس یک مگاهرتز باشد. به عبارت دیگر، نتایج میانگین مدول خطی تحت آزمایش التراسونیک در آب کاملاً مشابه مدول الاستیسیته تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای است و روند افزایشی و کاهشی در مدول الاستیسیته تحت خمش سه‌نقطه‌ای مشابه مدول خطی تحت التراسونیک می‌باشد. البته، نتایج عددی ممکن است با تغییر فرکانس تغییر کند؛ ولی بر مبنای تحقیق نورامبوئنا کونتراس و همکاران (۲۰۱۰) روند آن ثابت است. این بدان معناست که اگر فرکانس روند افزایشی و یا کاهشی داشته باشد، باز هم روند مدول خطی برای نمونه‌های آسفالتی

۲-۳. تحلیل نتایج مدول الاستیسیته با استفاده از
آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و مدول طولی با استفاده
از امواج التراسونیک

در نمونه‌های آسفالتی با فیلهای مختلف سرباره مس، سرباره فولاد و...، با تغییر اندازه مولکول‌ها (با توجه به نوع و ابعاد اتم‌ها) سرعت صوت تغییر خواهد کرد. سرعت صوت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای سرباره فولاد و سرباره مس متفاوت است. بنابراین، می‌توان دریافت که با تغییر اندکی از عناصر مختلف در هر نمونه، سرعت صوت در نمونه‌ها تغییر خواهد کرد. با توجه به اینکه مواد، انرژی را جذب، منعکس و عبور می‌دهند، لذا با تغییر مصالح، این ضرایب تغییر خواهند کرد. بنابراین، اینکه قدرت عبوردهی یا جذب صوت چه عنصری بیشتر است روی خواص الاستیک و قدرت جذب نمونه‌های آسفالتی تأثیر به‌سزایی خواهد گذاشت. لازم به ذکر است که سرعت انتشار صوت در مخلوط‌های آسفالتی دارای ۱۰۰ درصد GIM (۳۲۴۵ متر بر ثانیه) و ۱۰۰ درصد Zn (۲۳۶۰ متر بر ثانیه) به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر را داشته است. همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف سرعت بین نمونه‌های آسفالتی دارای فیلهای مختلف قابل توجه بوده که بیانگر تأثیر

تغییرات مدول طولی با امواج التراسونیک کاملاً مشابه با مدول الاستیسیته حاصل از شکست سه نقطه‌ای SCB می‌باشد. در حالتی که مدول طولی با به‌کارگیری امواج التراسونیک پیش‌بینی شده، مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر GIM نسبت به سایر مخلوط‌های آسفالتی مدول بزرگتری داشته و مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر Zn نیز کوچک‌ترین مدول الاستیسیته را دارا بوده‌اند. این در حالیست که هنگامی که از روش آزمایش SCB برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته مخلوط‌های آسفالتی دارای فیلر با درصد یکسان استفاده گردیده نیز به‌طور کلی، مخلوط‌های آسفالتی دارای فیلر GIM و Zn به‌ترتیب بزرگترین و کوچکترین مقدار مدول الاستیسیته را داشته‌اند. همچنین، تأثیر نوع فیلر بر میزان مدول طولی و مدول الاستیسیته کاملاً مشخص می‌باشد. ولی رفتار مدول الاستیسیته و مدول طولی با تغییر درصد فیلرهای جایگزین فیلر آهکی در هر مخلوط برای هر نوع فیلر متفاوت است. در این بین می‌توان گفت که وجود فضای خالی و اجزای عنصری متفاوت بر خواص مدول الاستیسیته متفاوت تأثیر می‌گذارد. در نهایت، با توجه به جدول ۷ می‌توان گفت که در بین نمونه‌ها به‌طور متوسط نمونه‌های حاوی GIM دارای مدول بالا می‌باشند که نشان‌دهنده ترد بودن آن نمونه‌ها بوده و نمونه‌های دارای سرباره روی نرم‌تر بوده که مدول طولی و الاستیسیته کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.

همانگونه است که در شکل ۸ نشان داده شده است. اندازه‌گیری مدول الاستیسیته تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبتاً وقت‌گیر و گران می‌باشد که می‌توان از آزمایش التراسونیک در آب بر مبنای این مطالعه به عنوان جانشین روش خمش سه نقطه‌ای استفاده نمود.

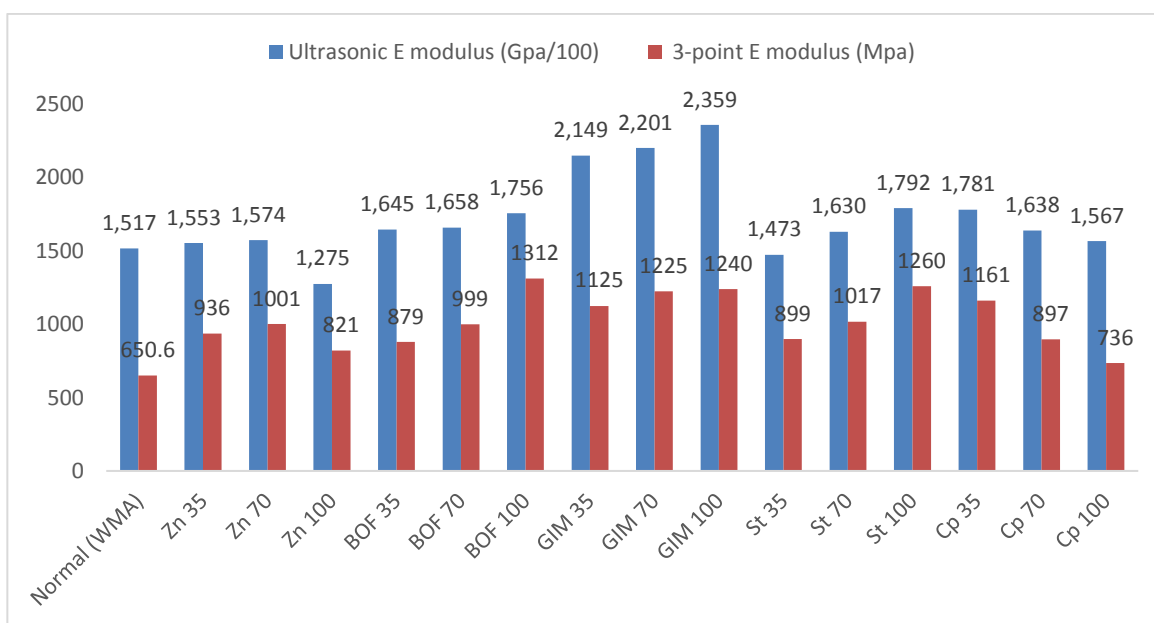
در این تحقیق، از امواج التراسونیک برای به‌دست آوردن مدول طولی استفاده شده است. نتایج حاصل با مدول الاستیسیته محاسباتی آزمون تست خمش سه نقطه‌ای مقایسه شده است. اگرچه استفاده از امواج التراسونیک برشی در شناسایی ویژگی‌های الاستیک نمونه‌های آسفالتی مناسب‌تر هستند اما به دلیل عدم عبور امواج برشی از آب در این مطالعه مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. هر چه دمای نمونه بیشتر شود، استفاده از روش‌های تماسی سودمندتر خواهد شد. در ادامه، نتایج اصلی ارتفاع و چگالی نمونه‌ها و سرعت صوت در جدول ۷ و همچنین مدول الاستیسیته و مدول طولی نمونه‌ها و امیدانس در مخلوط‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. در مورد نتایج مخلوط‌های حاوی BOF، سرباره آهن و سرباره مس، نتایج نشان داد که به‌طور میانگین، مخلوط‌های حاوی BOF به میزان ۱۱٪ و مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد و سرباره مس به ترتیب ۷ و ۹ درصد نسبت به نمونه شاهد مدول بیشتری دارند. می‌توان بیان نمود که نتایج برای هر نوع مخلوط با افزودنی خاص خود متفاوت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که روند

جدول ۷. نتایج اصلی چگالی، ارتفاع، قیر بهینه و همچنین سرعت صوت در مخلوط

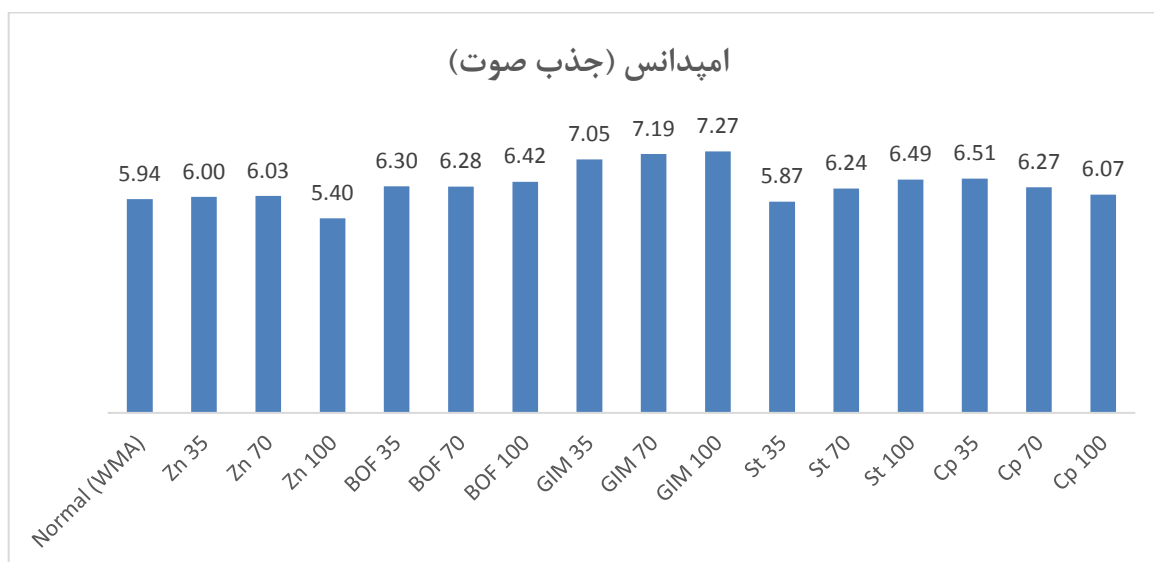
Type	Height (mm)	Optimum bitumen%	Density (kg/m ³)	Velocity (m/s)
Zn 35	64.9933	5.3	2320	2587.66
Zn 70	64.9967	5.4	2310	2610
Zn 100	64.4533	5.5	2290	2360
BOF 35	65.3367	5.3	2413	2611
BOF 70	65.2067	5.5	2381	2639
BOF 100	65.0367	5.7	2348	2735
GIM 35	69.0433	5.2	2310	3050

بررسی خواص مدول الاستیسیته و جذب صوت آسفالت نیمه گرم حاوی فیلهای رسانای حرارت- الکتریسیته با استفاده از امواج التراسونیک

GIM 70	67.4333	5.1	2350	3060.51
GIM 100	69.7133	5	2240	3245
St 35	65.63	5.6	2342	2508
St 70	64.9267	5.7	2385	2614.5
St 100	65.7967	5.8	2348	2762.63
Cp 35	65.2	5.4	2380	2735.33
Cp 70	66.46	5.5	2400	2612.65
Cp 100	64.4933	5.6	2350	2582
Normal (WMA)	66.8067	5.2	2330	2551.5



شکل ۸. مدول الاستیسیته و مدول طولی نمونه‌های آسفالتی تحت آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و التراسونیک



شکل ۹. امپدانس مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلهای رسانای حرارت تحت آزمایش التراسونیک

۳-۳. امیدانس و میرایی

جذب صوت مخلوط آسفالتی برای کاهش صداهای ایجاد شده در بزرگراه‌ها بسیار مؤثر می‌باشد. با کمک پارامتر امیدانس (جذب صوتی) می‌توان میزان میرایی صوت و فراصوت را مشخص کرد. در شکل ۹، امیدانس نمونه‌های آسفالتی حاوی فیلرهای مختلف نشان داده شده که در آن تأثیر نوع و میزان فیلرهای مختلف مشخص شده است. با استفاده از موج طولی می‌توان برای پیش‌بینی این سرعت‌ها و میزان امیدانس بهره برد. با توجه به اینکه قیر بهینه برای هر مخلوط در نظر گرفته شد، لذا می‌توان گفت که مخلوط‌های آسفالتی دارای فضای خالی تقریباً یکسانی بوده و اختلاف مخلوط‌ها در نوع و میزان فیلر سرباره‌ای می‌باشد که بر جذب صوت تأثیر گذاشته است. به طوری که بر مبنای نتایج شکل ۹، بیشترین و کمترین امیدانس به ترتیب متعلق به نمونه آسفالتی با ۱۰۰ درصد GIM و ۱۰۰ درصد فیلر روی می‌باشد. وجود فیلر در ماستیک اطراف قیر بر چسبندگی بین سنگدانه‌ها و در نهایت خواص مکانیکی آسفالت تأثیر دارد. همانطور که مشخص است، مقدار حداکثر و حداقل امیدانس در نمونه‌هایی اتفاق افتاده که بیشترین و کمترین سرعت صوت را داشته‌اند. لازم به توضیح است که فیلر GIM نسبت به دیگر فیلرها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص جذب صوت مخلوط آسفالتی داشته، به طوری که امیدانس مخلوط آسفالتی دارای ۱۰۰ درصد فیلر GIM نیز به مراتب بیشتر از امیدانس دیگر مخلوط‌های آسفالتی (حاوی انواع فیلر گفته شده) شده است. به علاوه، مخلوط‌های آسفالتی دارای فیلر روی (کلیه درصدها) نیز به طور کلی کمترین امیدانس یا جذب صوتی را داشته‌اند. بنابراین، با توجه به این که جذب صوت و امیدانس رابطه معکوس با یکدیگر دارند، مخلوط آسفالتی دارای فیلر ۱۰۰ درصد روی بیشترین و مخلوط آسفالتی دارای ۱۰۰ درصد فیلر GIM کمترین جذب صوت را نسبت به سایر مخلوط‌های بررسی شده در این پژوهش دارند. روند کلی

نتایج نشان‌دهنده این واقعیت است که به طور میانگین در مورد مخلوط‌های حاوی BOF، سرباره آهن، GIM و سرباره مس می‌توان گفت که مخلوط‌های حاوی BOF به میزان ۷٪ و مخلوط‌های حاوی سرباره آهن، GIM و سرباره مس به ترتیب ۴، ۲۰ و ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد امیدانس بیشتری دارند که این اختلاف را می‌توان در فضای خالی درون فیلرها و همچنین خواص عنصری آنها جستجو کرد.

۳-۴. تحلیل آماری

امروزه، جهت ساده‌سازی و نمایش نتایج مهندسی، از علم آمار استفاده می‌شود. در این قسمت، دو خروجی مورد نظر: مدول الاستیسیته (تحت آزمون سه نقطه‌ای) و مدول طولی (تحت امواج التراسونیک به صورت زیرآبی) نمونه‌های آسفالتی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. جهت نتایج آنالیز واریانس، از نرم‌افزار آماری استفاده شده است. در این بررسی، آنالیز واریانس مقادیر P-Value و F test مورد نظر بوده‌اند. در بررسی جدول ۸، آنالیز واریانس خواص الاستیک غیرمخرب E_{II} بوده است. در جدول ۸ مشخص شده که نوع ماده فیلر به لحاظ آماری در تغییرات مدول طولی تأثیر دارد. در جدول ۹، همانند جدول ۸، برای مدول الاستیسیته بر مبنای روش سه نقطه‌ای نیز این روند وجود دارد. ولی هر دو ورودی نوع فیلر و درصد آن اثرات خود را نشان داده‌اند. در صورتی که روش فراصوتی با توجه به مدل پارتو، درصد فیلر، عامل غیر مؤثر در فرآیند اندازه‌گیری است. در بررسی مدول الاستیسیته، درصد عنصر تأثیر بیشتری با توجه به مدل پارتو دارد. نتایج آنالیز واریانس برای فراصوت در جدول ۸ آمده است. کمتر از ۰/۰۵ بودن مقادیر P برای نوع فیلر مورد استفاده نشان از تأثیر این پارامتر در اندازه‌گیری مدول طولی داشته است. در صورتی که بیشتر از ۰/۰۵ بودن مقدار برای درصد فیلر از غیرمؤثر بودن در اندازه‌گیری فراصوت برای خواص

بررسی خواص مدول الاستیسیته و جذب صوت آسفالت نیمه گرم حاوی فیلرهای رسانای حرارت- الکتریسیته با استفاده از امواج التراسونیک

الاستیک داشته است. مقدار R^2 در این روش اندازه گیری عدد ۹۰ درصد را نشان داده است که این یعنی خطای حداکثر ۱۰ درصدی وجود دارد و مقدار مناسبی است. نتایج آنالیز واریانس برای آزمون سه نقطه در جدول ۹ آمده است. کم بودن مقادیر P نشان از مؤثر بودن و تأثیر هر دو پارامتر (نوع و درصد فیلر) در فرآیند اندازه گیری

مدول الاستیسیته دارد. مقدار R^2 در این حالت حدود ۸۰ درصد بوده و نسبتاً خطای ۲۰ درصد را نشان می دهد. در این حالت، اگرچه توزیع نرمال پایین تری در اطلاعات نسبت به روش فراصوتی مشاهده شده است، با این حال، ۸۰ درصد نیز خطای کمی در اندازه گیری است.

جدول ۸. تحلیل واریانس برای اندازه گیری مدول طولی به روش التراسونیک

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	242.901	40.4835	35.11	0.000
Linear	6	242.901	40.4835	35.11	0.000
Martials	4	235.388	58.8470	51.04	0.000
Percent's	2	7.513	3.7565	3.26	0.057
Error	23	26.519	1.1530		
Lack-of-Fit	8	20.762	2.5952	6.76	0.001
Pure Error	15	5.758	0.3838		
Total	29	269.420			
R-sq = 90.16%		R-sq(adj)= 87.59%		R-sq(pred)= 83.25%	

جدول ۹. تحلیل واریانس برای اندازه گیری مدول الاستیسیته به روش خمش سه نقطه ای

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	1072871	178812	16.05	0.000
Linear	6	1072871	178812	16.05	0.000
Martials	4	432675	108169	9.71	0.000
Percent's	2	640196	320098	28.72	0.000
Error	23	256307	11144		
Lack-of-Fit	8	234878	29360	20.55	0.000
Pure Error	15	21429	1429		
Total	29	1329178			
R-sq= 80.72%		R-sq(adj)= 75.69%		R-sq(pred)= 67.19%	

دارد. در این دو نمودار، با حذف عامل تداخل، این خطا برطرف شده است. زیرا که نوع مواد فیلر روی هم تأثیر ندارد و نمونه ها متفاوت از نمونه دیگر است. در آخر، به جهت ساده سازی ارتباط بین مدول الاستیسیته حاصل از امواج التراسونیک و مدول الاستیسیته تحت خمش سه نقطه ای و برای اینکه بر مبنای نتایج آزمایش

نتایج جداول ۸ و ۹ نشان می دهد که باقیمانده ها با توجه به عدم تقارن در آن ها مناسب ارزیابی شده است. این با توجه به حذف عامل تداخل^۱ بوده است. این یعنی در مقادیر اندازه گیری شده خطای سیستماتیک وجود ندارد. در صورتی که توزیع باقیمانده ها نسبت به برآزش و خط افق آن متقارن باشد خطای سیستماتیک وجود

^۱ - Interaction

• با توجه به رابطه امیدانس و میرایی صوت در مخلوط آسفالتی می‌توان گفت که آسفالت حاوی ۱۰۰ درصد فیلر سرباره روی جایگزین فیلر آهکی، بیشترین میرایی و کمترین امیدانس را داشت. این در حالی است که مخلوط نیمه‌گرم حاوی ۱۰۰ درصد فیلر GIM جایگزین فیلر آهکی دارای کمترین میرایی و بیشترین امیدانس می‌باشد.

• نتایج نشان‌دهنده این واقعیت است که به طور میانگین، مخلوط‌های حاوی BOF، سرباره آهن، GIM و سرباره مس به ترتیب به میزان ۷، ۴، ۲۰ و ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد امیدانس بیشتری دارند.

• بر مبنای تحلیل آماری، اگرچه تأثیر نوع عناصر بر مدول طولی مشخص است، ولی تأثیر درصد عناصر بر مدول طولی از نظر آماری معنادار نیست.

با توجه به اینکه در این تحقیق فقط نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم مورد تحقیق قرار گرفته و امکان تغییر در روند نتایج برای انواع مخلوط وجود دارد، لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده به بررسی مدول طولی و جذب صوت انواع آسفالت حاوی مواد رسانا (آسفالت داغ، متخلخل، ماستیک سنگدانه‌ای) پرداخته شود.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دست‌اندرکاران آزمایشگاه التراسونیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی که در انجام آزمایش‌ها بسیار کمک کرده‌اند، نهایت سپاس و قدردانی را دارند.

التراسونیک بتوان مقدار مدول الاستیسیته مخلوط که از آزمایش SCB به دست آمده را تخمین زد، از مدل رگرسیونی استفاده شده که بهترین مدل لگاریتمی بوده و به عنوان رابطه (۶) ارائه شده است. در این مدل، X همان مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش التراسونیک (۱۰۰ گیگاپاسکال) و Y نیز همان مدول الاستیسیته با استفاده از خمش سه‌نقطه‌ای و بر حسب مگاپاسکال است.

$$Y = 895.64 \ln(X) - 5653.4$$

$$R^2 = 0.5237 \quad (6)$$

۴. نتیجه‌گیری

این تحقیق، دو هدف مهم تحقیقاتی برای آسفالت‌های نیمه‌گرم حاوی فیلرهای هادی گرما و الکتریسیته (سرباره آهن، سرباره مس، سرباره روی، فیلر لجن کانورتور و فیلر کاهنده مقاومت الکتریسیته زمین GIM) در سه مقدار ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین فیلر آهکی را مورد بررسی قرار داده و به امکان‌سنجی استفاده از فناوری امواج التراسونیک جهت پیش‌بینی خواص مدول الاستیسیته و میزان جذب صوت در نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم پرداخته است. سپس، روند آزمایشگاهی پیش‌بینی مدول الاستیسیته و میزان جذب صوت آسفالت نیمه‌گرم حاوی فیلرهای مختلف رسانا با استفاده از امواج التراسونیک را مورد بحث قرار داده است. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر ارائه شده است.

• جذب صوت در آسفالت با فیلر GIM از سایر مخلوط‌ها بیشتر و جذب صوت در آسفالت با فیلر سرباره روی از سایر نمونه‌های آسفالتی کمتر می‌باشد.

• مدول طولی بر مبنای آزمایش التراسونیک و مدول الاستیسیته بر مبنای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای (SCB) هم‌راستا می‌باشند.

۶. مراجع

- Abdallah, I., Nazarian, S., Melchor-Lucero, O., & Ferregut, C. 1999, October. "Validation of Remaining Life Models Using Texas Mobile Load Simulator". In 1999 First Accelerated Pavement Testing Conference.
- Abdelfattah, H. F., Al-Shamsi, K., & Al-Jabri, K. 2018. "Evaluation of rutting potential for asphalt concrete mixes containing copper slag". *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7), 630-640.
- Aktaş, B. and Aslan, S. 2016. "Laboratory evaluation on waste slag produced zinc industry as mineral filler in stone mastic asphalt". 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1-3 June, Prague, Czech Republic. dx.doi.org/10.14311/EE.2016.383.
- Alber, S., Ressel, W., Liu, P., Wang, D. and Oeser, M. 2018. "Influence of soiling phenomena on air-void microstructure and acoustic performance of porous asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 158: 938-948.
- Arabani, M., Kheiry, P. T. and Ferdosi, B. 2009. "Laboratory evaluation of the effect of HMA Mixt parameters on ultrasonic pulse wave velocities". *Road Mater. Pavement Design*, 10(1): 223-232.
- Behnood, A., Gharehveran, M. M., Asl, F. G. and Ameri, M. 2015. "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash". *Constr. Build. Mater.*, 96: 172-180.
- Biligiri, K. P. and Kaloush, K. E. 2009. "Prediction of pavement materials' impedance using ultrasonic pulse velocity". *Road Mater. Pavement Design*, 10(4): 767-787.
- Biligiri, K. P., & Way, G. B. 2014. "Predicted E* dynamic moduli of the Arizona mixes using asphalt binders placed over a 25-year period". *Construction and Building Materials*, 54, 520-532.
- Cheng, J. W., Yang, S. K., Lee, P. H. and Huang, C. J. 2012. "Attenuation of guided wave propagation by the insulation pipe". In: *Petrochemicals, BoD-Books on Demand*.
- Cruz, R. A., Correa, C. R. and Díaz-Ramírez, G. A. 2019. "Acoustic properties of concrete modified with an asphalt/styrene butadiene emulsion". *J. Phys.: Conference Series*, 1247(1): 012036, IOP Publishing.
- De Nicola, F., Claudia, L., Maria Vittoria, P., Giulia, M., & Anna, A. 2011. "Biomonitoring of PAHs by using *Quercus ilex* leaves: source diagnostic and toxicity assessment". *Atmospheric Environment*, 45(7), 1428-1433.
- Du Tertre, A., Serhan Kırılancı, A., Cascante, G. and Tighe, S. L. 2022. "A non-destructive approach for the predictive master curve of ASPHALT pavements using ultrasonic and deflection methods". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(5): 1540-1551.
- Fakhri, M. and Ahmadi, A. 2017. "Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation". *Constr. Build. Mater.*, 147: 630-638.
- Fakhri, M., Bahmai, B. B., Javadi, S., & Sharafi, M. 2020. "An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives". *Journal of Cleaner Production*, 253, 119963.
- Fakhri, M., Javadi, S., Sassani, A. and Torabi-Dizaji, M. 2022. "Zinc slag as a partial or total replacement for mineral filler in warm mix asphalt and its effects on self-healing capacity and performance characteristics". *Mater.*, 15(3): 736.
- Hou, S., Deng, Y., Jin, R., Shi, X. and Luo, X. 2022. "Relationships between physical, mechanical and acoustic properties of asphalt mixtures using ultrasonic testing". *Build.*, 12(3): 306.
- Houel, A. and Arnaud, L. 2009. "Damage characterization of asphalt in laboratory by ultrasonic wave propagation". *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, June 30th-July 3rd, Nantes, France.
- Jiang, Z. Y., Ponniah, J. and Cascante, G. 2006. "Improved ultrasonic pulse velocity technique for bituminous material characterization". *Transportation Association of Canada*.
- Khalili, M. and Karakouzian, M. 2015. "Feasibility of ultrasonic measurements for characterizing rheological properties of asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 75: 220-226.
- Larcher, N., Takarli, M., Angellier, N., Petit, C. and Sebbah, H. 2015. "Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements". *Mater. Struct.*, 48(5): 1377-1388.
- Liapis, I. and Likoydis, S. 2012. "Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing". *Proc.-Soc. Behav. Sci*, 48: 907-918.
- Majhi, D., Karmakar, S. and Roy, T. K. 2017. "Reliability of ultrasonic pulse velocity method for determining dynamic modulus of asphalt mixtures". *Mater. Today: Proc.*, 4(9): 9709-9712.
- Modarres, A. and Alinia Bengar, P. 2019. "Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(8): 977-985.
- Motevalizadeh, S. M., Sedghi, R. and Rooholamini, H. 2020. "Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 240: 117965.

- Nabiun, N. and Khabiri, M. M. 2016. "Mechanical and moisture susceptibility properties of HMA containing ferrite for their use in magnetic asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 113: 691-697.
- Norambuena-Contreras, J., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., Celaya, M. and Lombillo-Vozmediano, I. 2010. "Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test". *Ndt & E Int.*, 43(7): 629-634.
- Perez, I., Pasandin, A. R. and Medina, L. 2011. "Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates". *Mater. Design*, 36: 840-846.
- Rodríguez-Fernández, I., Lastra-González, P., Indacoechea-Vega, I. and Castro-Fresno, D. 2021. "Technical feasibility for the replacement of high rates of natural aggregates in asphalt mixtures". *Int. J. Pavement Eng.*, 22(8): 940-949.
- Rose, J. L. 2014. "Ultrasonic guided waves in solid media". Cambridge University Press.
- Sztukiewicz, R. J. 1991. "Application of ultrasonic methods in asphalt concrete testing". *Ultrasonics*, 29(1): 5-12. doi.org/10.1016/0041-624X(91)90167-7.
- Tigdemir, M., Kalyoncuoglu, S. F. and Kalyoncuoglu, U. Y. 2004. "Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation". *NDT & E Int.*, 37(8): 597-602.
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., Vorobjovas, V. and Perveneckas, Z. 2016. "Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties". *Constr. Build. Mater.*, 112: 800-806.
- Van Velsor, J. K., Premkumar, L., Chehab, G. and Rose, J. L. 2011. "Measuring the complex modulus of asphalt concrete using ultrasonic testing". *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, 4(2).
- Vuorinen, M. and Hartikainen, O. P. 2001. "A new ultrasonic method for measuring stripping resistance of bitumen on aggregate". *Road Mater. Pavement Design*, 2(3): 297-309.
- Wu, J., Wang, L. and Meng, L. 2017. "Analysis of mineral composition and microstructure of gravel aggregate based on XRD and SEM". *Road Mater. Pavement Design*, 18(S3): 139-148.
- Wang, L., Song, Z. and Gong, C. 2022. "Power ultrasound on asphalt viscoelastic behavior analysis". *Case Stud. Constr. Mater.*, 16: e01012.

