

امکان‌سنجی استفاده از براده‌های ضایعات فلزی در آسفالت گرم و تاثیر آن بر پارامترهای مارشال، شیارشدگی و ضریب اصطکاک

حسن دیواندری^{*}، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

امیر فریدونی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۵ - پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵

صفحه ۳۹-۲۵

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی تاثیر استفاده از سه نوع براده فلزی آهن، چدن و آلومینیوم بر پارامترهای مارشال مخلوط آسفالتی گرم، مقاومت شیار شدگی و ضرایب اصطکاک مخلوط آسفالتی انجام گرفته است. به این منظور مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد از هر کدام از براده‌های مذکور به مخلوط آسفالتی اضافه شد و پس از انجام تراکم، مقادیر استحکام، نرمی، فضای خالی مصالح، فضای خالی پر شده با فیر، دانسیته و فضای خالی آسفالت با استفاده از تجهیزات آزمایش مارشال اندازه گیری شد. لازم به ذکر است که علاوه بر اندازه گیری پارامترهای فوق، آزمایش‌های اثر جای چرخ و آزمایش تعیین ضرایب اصطکاک به ترتیب برای اندازه گیری مقاومت شیار شدگی و مقاومت لغزشی مخلوط‌ها انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های مارشال نشان داد که افزودن براده‌های فلزی به خصوص چدن و آهن، دارای تاثیر مثبت بر پارامترهای مارشال بوده است. اما در درصد‌های مختلف، این افزودنی‌ها عملکرد متفاوتی در تغییر پارامترهای مارشال داشته اند. نتایج آزمایش مقاومت شیارشدگی نشان می‌دهد که افزودن ۵ درصد براده آهن و چدن دارای تاثیر مثبتی در کاهش عمق شیار بوده است. اما افزایش درصد این افزودنی‌ها دارای عملکرد معکوس می‌باشند و موجب افزایش عمق شیار شدگی نسبت به حالت پایه می‌شوند. در نهایت نتایج آزمایش مقاومت اصطکاکی نشان داد که اضافه کردن براده‌های فلزی آهن و چدن موجب افزایش ضرایب اصطکاک نمونه‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شیارشدگی، ضایعات فلزی، مخلوط آسفالتی، مقاومت مارشال

۱- مقدمه

اصلاح مصالح با این مواد می‌تواند سبب بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و افزایش قابل توجه مقاومت کششی، فشاری، برشی و غیره در آسفالت گردد (زیاری، دیواندری و افشین، ۱۳۹۶). کیفیت ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم تاثیر مستقیم بر عملکرد^۱ روسازی انعطاف پذیر^۲ دارد. از طرفی شیار شدگی^۳ مسیر چرخ‌ها و کمبود اصطکاک رویه آسفالتی، ایمنی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد (فریدونی و دیواندری، ۱۳۹۵). تحقیقات نشان داده که یکی از مشکلات روسازی های آسفالتی، وقوع تغییر شکل‌های ماندگار^۴ قابل

در سالیان اخیر، روند صعودی هزینه‌های مرمت و بازسازی روسازی راه‌ها، فرودگاه‌ها و بنادر که در اثر افزایش شدت و تکرار بارهای ترافیکی ایجاد می‌شود، موجب شده است تحقیقات جامعی در زمینه ساخت مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بالا انجام گیرد. یکی از راهکارهای ارائه شده در این خصوص، تغییر در اجزای تشکیل دهنده آسفالت و افزودن موادی است که می‌تواند با برطرف کردن نقاط ضعف مخلوط آسفالتی، موجب تقویت آن شود. این تغییر از طریق افزودن الیاف طبیعی، مصنوعی و یا سایر افزودنی‌ها صورت می‌گیرد.

توجه در آنها است. پدیده خزش^۵، پیدایش تدریجی نشست‌ها و تغییر مکان‌های پایدار و بدون ایجاد ترک در روسازی‌ها، تحت اعمال بارهای ثابت است. این تغییر شکل پایدار که بطور عینی به صورت شیارشدگی مسیر چرخ‌ها نمایان می‌گردد، از معیارهای اولیه طرح روسازی‌های آسفالتی بشمار می‌رود (عربانی و میر عبد العظیمی، ۱۳۸۸). در دهه گذشته استفاده مجدد از مواد زائد، اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است و علت آن تاکید بر قوانین زیست محیطی و کاهش آلودگی‌های ناشی از زباله‌های صنعتی است (عامری، زارعی و جهانپان، ۱۳۸۷). با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، استفاده از افزودنی‌های بازیافتی اثرات مثبت و تقویت‌کننده‌ای بر خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی دارد. اما به ندرت از ضایعات فلزی در مخلوط آسفالت استفاده شده است و این موضوع دلیلی شد تا نویسندگان در پژوهش حاضر، امکان استفاده از سه نوع براده ضایعاتی چدن، آهن و آلومینیوم در مخلوط آسفالتی گرم را از طریق انجام آزمایش‌های مارشال، شیار شدگی و تعیین ضرایب اصطکاک، ارزیابی و نتایج حاصل از استفاده این سه نوع براده فلزی را با یکدیگر مورد مقایسه قرار دهند.

۲- پیشینه تحقیق

بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه نشان داد که استفاده از الیاف شیشه باعث بهبود خواص عملکردی در مخلوط آسفالتی می‌شود. در این پژوهش مشخص گردید استفاده از الیاف شیشه می‌تواند از بروز ترک در آسفالت که بعنوان یکی از خرابی‌های عمده روسازی انعطاف پذیر مطرح است، جلوگیری کند و یا حداقل آن را کاهش دهد (دیواندری و شعبانی، ۱۳۹۵). مهیار عربانی و سید محمد میرعبدالعظیمی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر آهن ضایعاتی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از پودر آهن ضایعاتی می‌تواند تأثیرات مثبت قابل توجهی در رفتار دینامیکی روسازی‌های آسفالتی از خود برجا گذارد و علاوه بر افزایش کارایی روسازی‌های آسفالتی، خواهد توانست هزینه‌های ساخت شبکه راه‌ها را کاهش دهد. از این رو استفاده از این ضایعات در ساخت آسفالت، می‌تواند به عنوان راهکاری در جهت کاهش اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از انباشت این مواد در طبیعت، مطرح شود (عربانی و میر عبد العظیمی، ۱۳۸۸). در تحقیق دیگری، عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با خرده شیشه‌های ضایعاتی بررسی و نتیجه گرفته شد که نمونه‌های

برای تمامی نمونه‌ها با درصد‌های مختلف افزودنی، ثابت و برابر قیر بهینه بدست آمده برای نمونه‌های شاهد، فرض شده است.

۳- روش تحقیق

این تحقیق با هدف استفاده از براده‌های آهن، چدن و آلومینیوم در مخلوط‌های آسفالتی برای بهبود پارامترهای آن و تولید نمونه‌های آسفالتی با کیفیت بهتر انجام شده است تا علاوه بر افزایش پارامترهای عملکردی بتواند نقش مثبتی در کاهش اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از دفع ضایعات فلزی داشته باشد. همانطور که ذکر شد آزمایش‌های مارشال، شیارشدگی و ضریب اصطکاک برای نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است دانه بندی استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها، دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ می‌باشد. پس از اینکه درصد قیر بهینه تعیین گردید یک سری نمونه بدون افزودنی به عنوان نمونه شاهد ساخته شد و سپس سایر نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ درصد براده‌های ضایعاتی در اندازه ۰/۳ میلی‌متر از دانه‌بندی مورد نظر، ساخته شدند. در نهایت آزمایش‌های تکمیلی برای ارزیابی نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف افزودنی، انجام گرفت.

مصالح و قیر مورد استفاده (مصالح سنگی)

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از رودخانه پلرود کلاچای تهیه گردیده است و دانه‌بندی مورد استفاده بر اساس حد وسط دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ نشریه شماره ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) مطابق با جدول (۱)، انتخاب گردید.

می‌شود. این میزان تولید، نمایانگر نقش تاثیرگذار آسفالت در اقتصاد و توسعه کشور می‌باشد. آنچه که در این زمینه حائز اهمیت است کاهش هزینه‌های هنگفت تعمیر و نگهداری در این صنعت می‌باشد. طبق اظهار نظر کارشناسان با ارتقاء کیفیت و بالا بردن عمر مفید آسفالت خیابان‌ها و جاده‌های کشور می‌توان تا سالانه ۱۲۰۰ میلیارد تومان در هزینه‌های عمرانی صرفه جویی کرد (خبرگزاری مهر، ۱۳۹۶). همانطور که در بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص گردید با اضافه کردن ضایعاتی مثل شیشه، پودر آهن، خرده لاستیک و پلاستیک‌ها یا پلیمرها، مشتقات نفتی یا هیدروکربن‌ها و... می‌توان آسفالتی با کیفیت بهتر و مقاوم‌تر که دارای مزایایی ذیل است، تولید نمود.

۱) کاهش قیمت اولیه ساخت،

۲) کم شدن ضخامت لایه‌های آسفالتی،

۳) کم شدن هزینه‌های تعمیر و نگهداری و طولانی شدن

فواصل بین بهسازی رویه‌های آسفالتی،

۴) مقاومت بیشتر آسفالت،

۵) بکار گرفتن ضایعات صنایع مختلف،

۶) کاهش اثرات مخرب زیست محیطی.

پژوهش حاضر با بررسی امکان استفاده از ضایعات فلزی آهن، آلومینیوم و چدن حاصل از کارگاه‌های جوشکاری و تراشکاری، به دنبال تحقق اهداف فوق می‌باشد. با توجه به نتایج مثبتی که با استفاده از مواد افزودنی طبیعی و مصنوعی در پژوهش‌های پیشین بدست آمده است، در این تحقیق فرض بر این است که افزودن در صد مشخصی از ضایعات در دانه‌بندی آسفالت موجب بهبود پارامترهای عملکردی آسفالت، مقاومت شیارشدگی و ضرایب اصطکاک آن خواهد شد. ضمناً در این پژوهش با هدف بررسی تاثیر میزان افزودنی بر مشخصات عملکردی آسفالت، میزان قیر بهینه

جدول ۱. دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ (نشریه ۲۳۴)

اندازه الک (میلیمتر)	حد وسط درصد عبوری
۱۹	۱۰۰
۱۲/۵	۹۵
۹/۵	---
۴/۷۵	۵۹
۲/۳۶	۴۳
۰/۳	۱۳
۰/۰۷۵	۶

در جدول (۲) قابل مشاهده است.

قیر مصرفی
قیر مصرفی از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ بود که از پالایشگاه
تبریز تهیه شد.

آزمایش‌های قیر
برای اطمینان از مشخصات قیر مورد استفاده، آزمایش‌های
رایج قیر مطابق با جدول (۳) انجام گرفت.

آزمایش‌های مصالح سنگی

آزمایش‌های انجام شده روی مصالح سنگی شامل
آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ^۹ (AASHTO-T89)،
تعیین ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)، تعیین شاخص
تطویل و تورق (ASTM-D4791)، تعیین درصد افت
وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس (AASHTO-
T96)، تعیین افت وزنی در مقابل سولفات
سدیم (AASHTO-T104)، تعیین درصد شکستگی در
یک جبهه و دو جبهه (ASTM-D5821) می‌باشد. نتایج
حاصل از این آزمایش‌ها برای مصالح سنگی مورد استفاده و
همچنین حدود قابل قبول آیین‌نامه در خصوص هر آزمایش،

جدول ۲. آزمایش‌های مصالح سنگی مورد استفاده در پژوهش

نتایج آزمایش			حد قابل قبول	استاندارد	مشخصه
فیلر مصالح	ماسه	مخلوط دانه درشت			
—	۶۷	—	حداقل ۵۰٪	AASHTO-T76	ارزش ماسه‌ای
—	—	C	-		درصد افت وزنی نوع دانه بندی
—	—	۵۰۰	-	AASHTO-T96	در مقابل سایش تعداد دور به روش لس
—	—	۲۳	حداکثر ۲۵٪ برای رویه		آنجلس درصد سایش
N.P	N.P	—	غیر خمیری		دامنه خمیر (PI)
	—	—	-	AASHTO-T89	حد خمیری (PL) حدود اتربرگ
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	—	-		حد روانی (LL)
—	—	۹۷	حداقل ۸۵٪		درصد شکستگی در یک جبهه
—	—	۹۶	حداقل ۸۰٪	ASTM-D5821	مصالح سنگی در دو جبهه

روی الک ۴

درصد تطویل و تورق	حداکثر طول به حداقل ضخامت بزرگتر از ۵	ASTM-D4791	حداکثر ۱۵٪	صفر	—	—
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	* حد اکثر ۸٪ برای مصالح درشت‌دانه و ۱۲٪ برای مصالح ریزدانه	AASHTO-T104	۱/۳	۱/۱	—	—

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های قیر مورد استفاده

مشخصات استاندارد قیرهای خاص	نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیرهای خالص
		AASHTO	ASTM	
حداکثر	حداقل			
—	—	۱/۰۲۱	T228	D70 وزن مخصوص در ۲۵ سانتی‌گراد
۷۰	۶۰	۶۵	T49	D5 درجه نفوذ در ۲۵ سانتی‌گراد بر حسب ۰/۱ میلی‌متر
۵۶	۴۹	۵۰	T53	D36 نقطه نرمی (ساچمه - حلقه) بر حسب درجه سانتی‌گراد
—	۹۹	۹۹/۴	T44	D2042 حلالیت در تری کلرواتیلن بر حسب درصد
—	۲۳۲	۳۲۲	T48	D92 درجه اشتعال (رو باز - کلوند) بر حسب درجه سانتی‌گراد
—		۶۹۶/۵	T201	D2170 کندروانی سینماتیک در ۱۲۰ سانتی‌گراد (سانتی استوکس)
—		۳۲۴/۷	T201	D2170 کندروانی سیستماتیک در ۱۳۵ سانتی‌گراد (سانتی استوکس)
۰/۸		۰/۰۲	T179	D1754 لعاب نازک قیر (۱۶۳ سانتی‌گراد پنج ساعت) افت حرارتی درصد
—		۳۹		درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلی‌متر

فیلمر
فیلمر پودر سنگ و سیمان تیپ ۲ دیلمان به‌عنوان فیلمر مصرفی در ساخت نمونه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت.

مشخصات ضایعات
همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، براده فلزهای ضایعاتی مورد استفاده شامل براده‌های آهن، چدن و آلومینیوم با انداز ۰/۳ میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۱. براده‌های فلزی مورد استفاده در این پژوهش

۴- آماده کردن نمونه‌های آزمایشگاهی

پس از ساخت هجده نمونه و انجام مراحل مختلف طرح اختلاط مارشال، مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های اصلاح نشده به مقدار ۵/۵ درصد محاسبه گردید. این درصد قیر برای ساخت تمامی نمونه‌ها استفاده شد. بدین جهت که تفاوت در درصد قیر نمونه‌های مختلف، می‌تواند باعث ایجاد خطا در تحلیل نتایج گردد. در مرحله بعد برای ساخت نمونه‌های متراکم، ابتدا تعداد سه نمونه مخلوط آسفالتی بدون مواد افزودنی به عنوان نمونه‌های شاهد ساخته شدند. سپس نمونه‌های اصلاح شده با افزودن براده ضایعاتی با درصدهای ۱۰،۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ از مصالح ال‌ک نمره پنجاه، ساخته شدند. لازم به ذکر است که پیش از اختلاط مصالح ابتدا سنگدانه‌ها و قیر مصرفی به ترتیب به میزان ۱۷۶ و ۱۳۷ درجه سانتیگراد گرم و سپس با یکدیگر مخلوط شدند. عمل تراکم مخلوط‌ها با اعمال ۷۵ ضربه چکش مارشال به هر طرف نمونه بر اساس نشریه ۲۳۴ انجام شد.

آزمایش‌های نمونه‌های آسفالتی

آزمایش مارشال

در این بخش از پژوهش، پارامترهای مارشال مخلوط آسفالتی شامل: وزن مخصوص مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی آسفالت، استقامت مارشال، روانی^۱ مارشال، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر محاسبه شدند.

آزمایش شیارشدگی

مقاومت در برابر شیارشدگی یکی از مشخصه‌های مهم و ضروری مورد نیاز در مخلوط‌های آسفالتی است (Domingos et al., 2018). با بررسی مطالعات پیشین

مشخص می‌شود که محققین روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند، مانند ویلتراک^{۱۱}، خزش دینامیکی و استاتیکی و کشش غیر مستقیم (Ziari and Divandari, 2017) (Javilla et al., 2013). در این میان آزمایش ویلتراک به دلیل توانایی در شبیه سازی شرایط واقعی، بیشتر مد نظر پژوهشگران قرار گرفته است (Alataş et al., 2018). لذا، در پژوهش حاضر از این آزمایش برای ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی، استفاده شده است. برای انجام آزمایش ویلتراک، با استفاده از ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد مصالح نمره پنجاه براده آهن و چدن، مجموعاً شش نمونه اصلاح شده ساخته شد. لازم به توضیح است که چون براده آلومینیوم باعث کاهش مقاومت شیارشدگی می‌شد، نمونه آلومینیومی ساخته نشد. به منظور آماده سازی، نمونه‌های آسفالتی به مدت شش ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. در نهایت هر نمونه تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری زیر چرخ لاستیکی با تنش ۶۹۰ کیلو پاسکال در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و عمق شیار ایجاد شده قرائت گردید.

آزمایش تعیین ضریب اصطکاک

مقاومت اصطکاک آسفالت، قابلیت رویه برای به حداقل رساندن امکان سُر خوردن یا لغزیدن چرخ‌های وسیله نقلیه، به ویژه در شرایط مرطوب است. برای تأمین مقاومت اصطکاک مطلوب، عاج لاستیک باید بجای حرکت بر روی لایه‌ای از آب در سطح روسازی (آب پیمائی)، قادر به حفظ تماس با دانه‌های مصالح سنگی باشد. تاب لغزشی روسازی معمولاً در سرعت (کیلومتر بر ساعت) ۶۵ با لاستیک دارای

استفاده شده است (شکل (۲)).

نتایج حاصل از آزمایش مارشال
استحکام مارشال

استحکام مارشال در روش طرح اختلاط مارشال، حداکثر باری است که نمونه می‌تواند تا قبل از گسیخته شدن تحمل نماید (زیاری و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج حاصل از استحکام مارشال در نمودار شکل (۳) قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزودن براده‌های فلزی منجر به افزایش استحکام نمونه‌ها شده است. واضح است که با افزایش درصد براده‌های آهن و چدن استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. اما این روند برای نمونه‌های حاوی آلومینیوم به صورت برعکس می‌باشد. به طوری که ۵ تا ۱۰ درصد براده آلومینیوم باعث افزایش استحکام شده است. اما در درصد های بالاتر نرخ تغییر مقاومت مارشال، نزولی است.

عاج استاندارد در شرایط مرطوب کنترل شده، اندازه‌گیری می‌شود. بهترین تاب لغزشی با مصالح سنگی دارای بافت زبر در مخلوط با دانه‌بندی نسبتاً باز و مصالح سنگ با اندازه بزرگترین دانه ۹/۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر به دست می‌آید. علاوه بر داشتن سطح زبر، مصالح سنگی باید در برابر صیقلی شدن (صاف شدن) زیر ترافیک مقاومت کنند. مصالح سنگی آهکی آسان‌تر از مصالح سنگی سیلیسی صیقلی می‌شوند. مخلوط‌های ناپایداری که مستعد شیارشدگی یا قیرزدگی هستند، مشکلات جدی تاب لغزشی ایجاد می‌کنند (نیازی، ۱۳۹۰). از این رو کنترل پارامتر مذکور به خصوص برای آسفالت ساخته شده با این مصالح، اهمیت می‌یابد. در پژوهش حاضر جهت اندازه‌گیری مقاومت اصطکاکی نمونه‌ها از دستگاه "تعیین ضریب اصطکاک نمونه‌های آسفالتی ژیراتوری به وسیله شبیه سازی مقاومت لغزشی" با طبقه‌بندی بین المللی (E0IC;G0IN3156) و شماره ثبت اختراع ۹۲۴۴۵ ساخته شده در دانشگاه آزاد واحد نوشهر

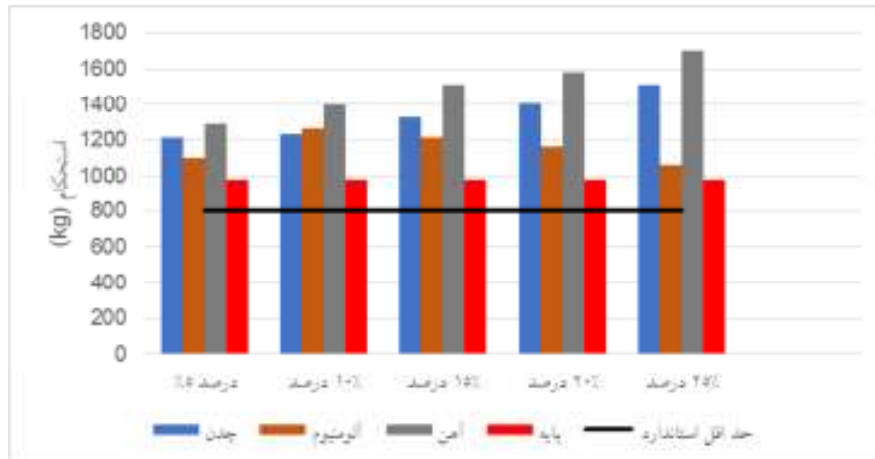


شکل ۲. دستگاه تعیین ضریب اصطکاک لغزشی نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی

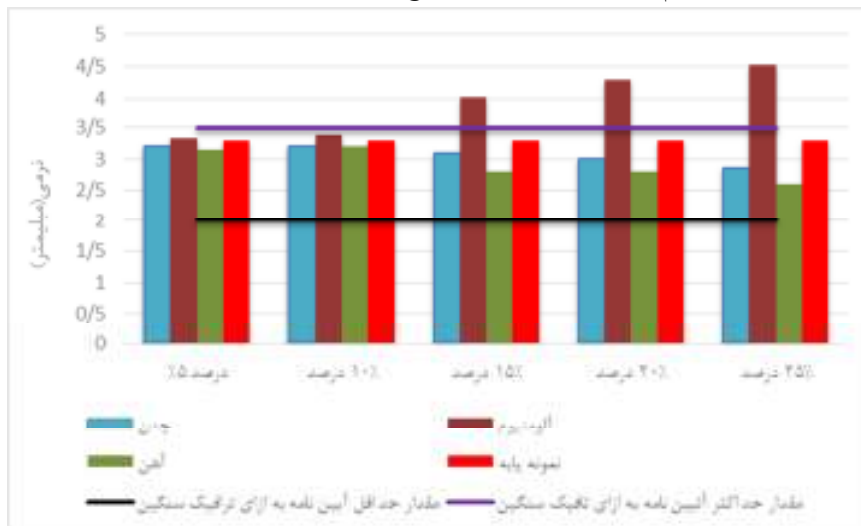
روانی مارشال

روانی (نرمی) مارشال که برحسب میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود، تغییر شکل عمودی کل نمونه هنگامی که تا حداکثر میزان ممکن بارگذاری شود، می‌باشد. مخلوط‌هایی با میزان روانی کم، سفت بوده و به سختی متراکم می‌شوند. در عین حال، این مخلوط‌ها در قیاس با مخلوط‌های با روانی زیاد، مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی از خود نشان می‌دهند. مخلوط‌های با میزان روانی بیشتر از محدوده تعیین شده، مخلوط‌های حساس می‌باشند که مستعد تغییر شکل دایمی هستند (زیاری و همکاران، ۱۳۹۶). با مشاهده شکل (۴) مشخص است که افزودن چدن و آهن باعث کاهش

نرمی مخلوط‌ها می‌شود. اما براده آلومینیوم، نرمی مخلوط‌ها را افزایش داده است. با افزایش درصد براده آهن و چدن مقدار نرمی کاهش می‌یابد و برعکس، افزایش براده آلومینیوم، منجر به افزایش نرمی شده است. به طوری که در درصد‌های کمتر از ۱۰ درصد، میزان تغییرات نرمی ناچیز است. اما در درصد‌های بالاتر براده آلومینیوم، میزان نرمی نمونه‌ها افزایش قابل توجهی داشته است. به گونه‌ای که افزودن ۲۵ درصد براده آلومینیوم، منجر به افزایش ۳۷/۲۷ درصدی نرمی نمونه نسبت به حالت شاهد شده است.



شکل ۳. استحکام مارشال نمونه‌های پایه و اصلاح شده در درصد‌های مختلف افزودنی



شکل ۴. مقادیر روانی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با درصد‌های مختلف براده فلزات

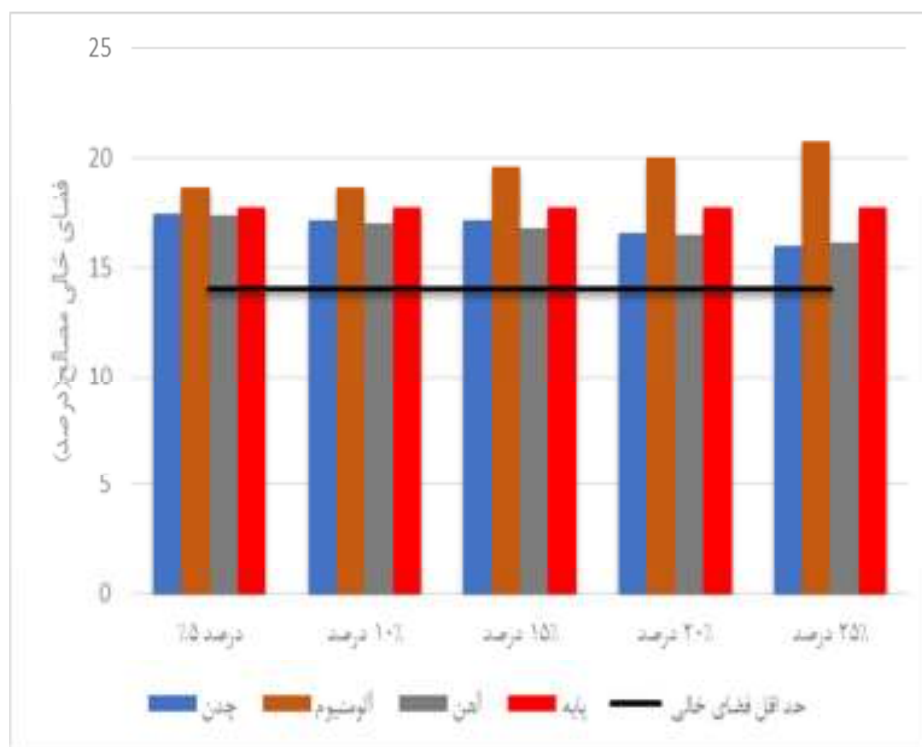
فضای خالی مصالح

VMA کمتر از حداقل بدست آید، موجب نازک شدن لعاب قیر و کم شدن دوام مخلوط می‌گردد. بنابراین، صرفه‌جویی در مقدار قیر با کاهش دادن VMA عملاً نامناسب بوده و به کیفیت روسازی صدمه می‌زند (نیازی، ۱۳۹۰). با بررسی نتایج مشخص می‌شود که فضای خالی مصالح سنگی در نمونه‌های اصلاح شده با براده‌های آهن و چدن کاهش یافته است. به طوری که با افزایش مقدار براده آهن و چدن، فضای خالی مصالح سنگی کمتر می‌شود. کاهش درصد فضای خالی مصالح سنگی برای نمونه‌های اصلاح شده با ۲۵ درصد براده چدنی و آهنی به ترتیب ۹/۸ و ۹/۰۴۴ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد می‌باشد که این امر نشان دهنده کاهش بیشتر فضای خالی مصالح در اثر اصلاح با براده چدن است.

فضای خالی در مصالح سنگی^{۱۲} (VMA) فضای خالی موجود بین سنگدانه‌ها در روسازی آسفالتی متراکم شده است. VMA نشان‌دهنده فضای موجود برای جادادن حجم قیر مؤثر (تمامی قیر بجز بخش جذب شده توسط مصالح سنگی) است. در مصالح سنگی خشک هر چه VMA بیشتر باشد، فضای قابل استفاده برای لعاب قیر بیشتر است. دوام مخلوط با افزایش ضخامت لعاب قیر روی سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین، حداقل VMA لازم به صورت تابعی از اندازه مصالح سنگی توصیه شده و مشخص می‌گردد. حداقل VMA برای دستیابی به لعاب قیر با ضخامت کافی که سبب دوام روسازی می‌شود، ضرورت دارد. افزایش دادن وزن واحد حجم مصالح سنگی دانه‌بندی شده تا جایی که مقادیر

شکلی که با افزایش درصد استفاده از آن، درصد فضای خالی مصالح بیشتر خواهد شد.

همانطور که در شکل (۵) مشخص است، استفاده از براده آلومینیم موجب افزایش فضای خالی مصالح می شود به

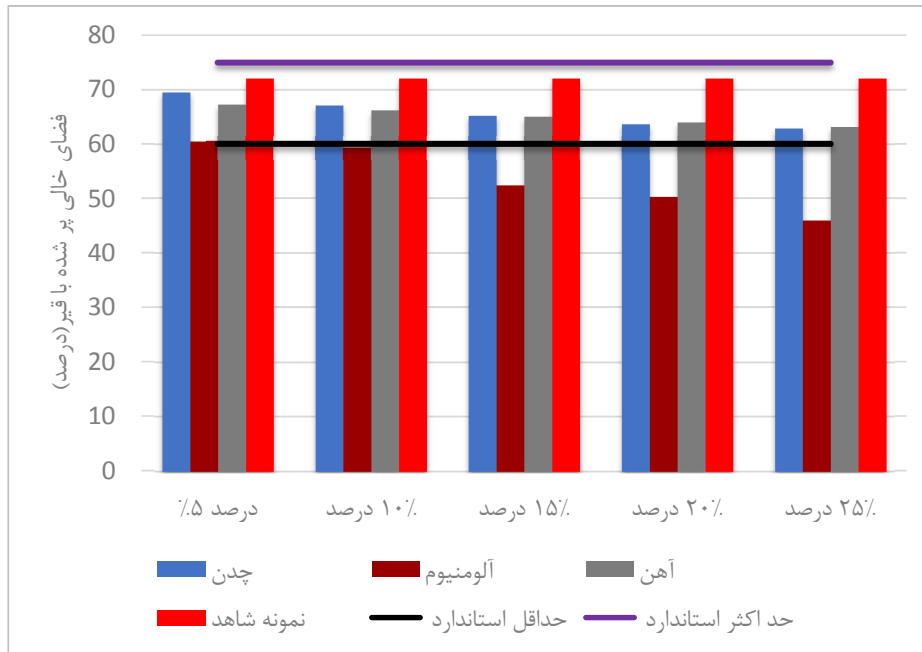


شکل ۵. مقادیر درصد فضای خالی مصالح سنگی در درصدهای مختلف افزودنی

فضای خالی پر شده با قیر

قیر برای نمونه‌های اصلاح شده، کمتر از نمونه‌های شاهد باشد که این امر در نمودار شکل (۶) قابل مشاهده است. کمترین درصد فضای خالی پر شده با قیر، مربوط به نمونه‌های اصلاح شده با آلومینیم است به طوری که با افزایش درصد براده آلومینیم، میزان درصد فضای خالی پر شده با قیر کاهش می‌یابد تا حدی که از مقدار حداقل استاندارد نیز کمتر می‌شود. برای نمونه‌های اصلاح شده با براده آهن و چدن روند ثابتی وجود ندارد. به این صورت که در ابتدا و در درصدهای ۵ تا ۱۵ درصد، فضای خالی پر شده با قیر برای نمونه‌های اصلاح شده با چدن بیشتر از آهن است. اما در درصدهای بالای ۱۵ درصد، مقدار این پارامتر برای نمونه‌های اصلاح شده با براده آهن بزرگ‌تر است.

فضای خالی پر شده با قیر^{۱۳} (VFA) عبارت از درصد فضای خالی بین سنگدانه‌ای (VMA) است که حاوی قیر بوده یا با قیر پر شده است. VFA برای اطمینان از اینکه در یک مخلوط بخش قیر مؤثر، خیلی کم (کم دوام) یا خیلی زیاد (ناپایدار) نیست، بکار می‌رود. حدود قابل قبول VFA بسته به سطح ترافیک راه تغییر می‌کند. ترافیک سنگین‌تر به VFA کمتری نیاز دارد، زیرا مقاومت و پایداری مخلوط اهمیت بیشتری دارد. راه‌های با ترافیک سبک برای افزایش پایداری مخلوط آسفالتی به حدود بزرگ‌تری از VFA نیاز دارند. با این وصف، VFA خیلی زیاد عموماً سبب خمیری شدن مخلوط می‌گردد (نیازی، ۱۳۹۰). متناسب با آنچه که در بخش قبل ذکر شد، انتظار می‌رود که فضای خالی پر شده با



شکل ۶. درصد فضای خالی پر شده با قیر در نمونه‌های با درصد‌های مختلف افزودنی

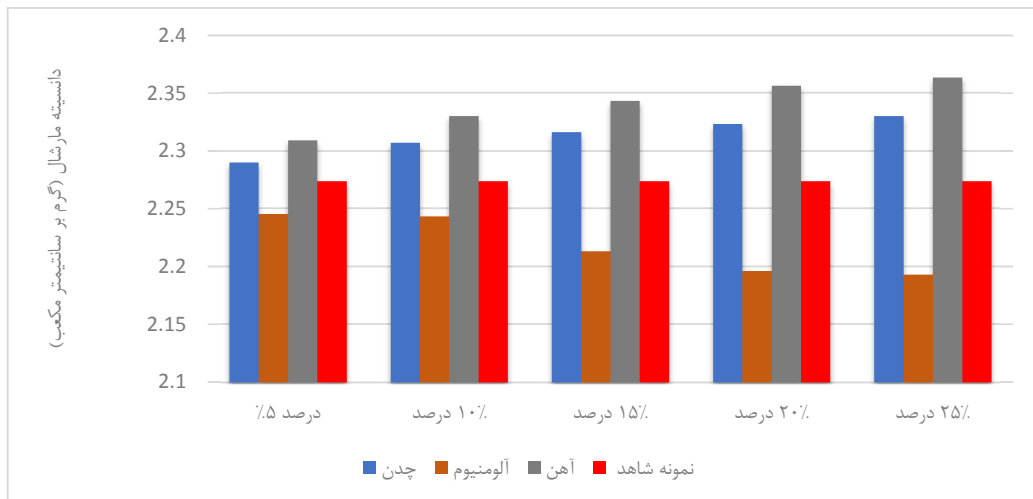
دانشیسته مارشال

روند تغییرات دانشیسته نمونه‌ها با توجه به مقدار براده فلزات مختلف در نمودار شکل (۷)، نشان داده شده است. افزایش میزان براده آلومینیم در مخلوط، منجر به کاهش این پارامتر در مخلوط آسفالتی شده است. اما افزایش میزان براده آهن و چدن، باعث افزایش دانشیسته آسفالت شده است.

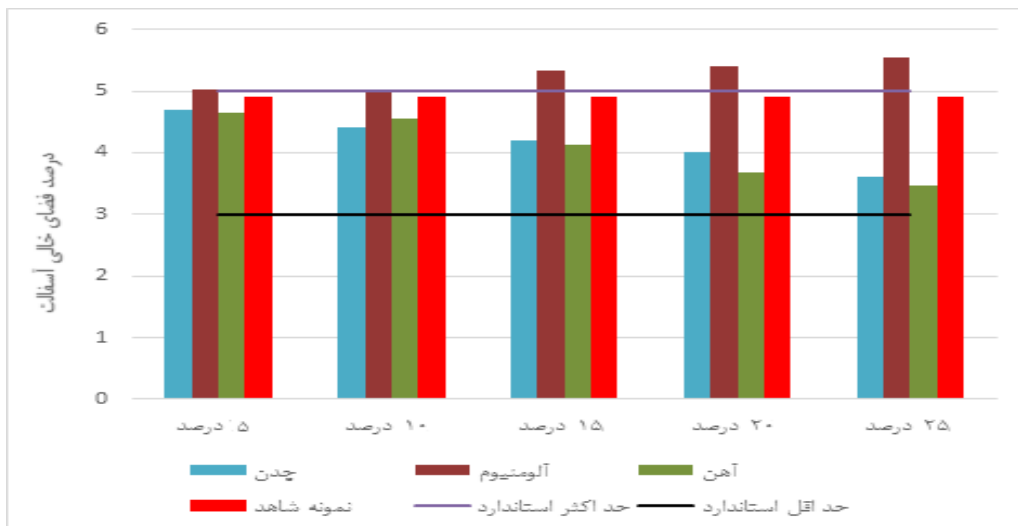
درصد فضای خالی آسفالت

فضای خالی^{۱۴} (AV) حفره‌های ریز هوا بین مصالح سنگی پوشیده شده با قیر در مخلوط آسفالتی متراکم شده هستند. وجود درصد معینی فضای خالی در مخلوط آسفالتی متراکم شده از لحاظ پذیرش تراکم جزئی زیر ترافیک و انبساط جزئی قیر به سبب افزایش دما، ضرورت دارد. درصد فضای خالی مجاز در نمونه‌های آزمایشگاهی برای لایه رویه بین ۳ تا ۵ درصد است (نشریه ۲۳۴). دوام روسازی آسفالتی تابعی از مقدار فضای خالی آن است. هرچه فضاهای خالی کمتر باشند، نفوذپذیری مخلوط کمتر است. وجود فضای خالی زیاد، مجاری ورود هوا و آب که زیان‌آور هستند را به

داخل مخلوط فراهم می‌سازد. از طرفی کمبود بیش از حد فضای خالی می‌تواند منجر به قیرزدگی شود (نیازی، ۱۳۹۰). وزن واحد حجم و مقدار فضای خالی با یکدیگر رابطه معکوس دارند. هرچه وزن واحد حجم بیشتر باشد، فضای خالی در مخلوط کمتر است و برعکس. همانطور که از شکل (۸) قابل مشاهده است، افزودن براده‌های چدن و آهن مقدار فضای خالی آسفالت را کاهش داده است بگونه‌ای که هرچه درصد این براده‌ها بیشتر شود، مقدار فضای خالی بیشتر کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه، تفاوت در مقادیر فضای خالی نمونه‌های حاوی براده‌های آهن و چدن در درصد‌های مختلف است. همانطور که انتظار میرفت مقدار فضای خالی آسفالت در نمونه‌های حاوی براده آلومینیم بیشتر از سایر نمونه‌ها است و با افزایش درصد این ماده مقدار فضای خالی آسفالت بیشتر شده تا حدی که مقدار فضای خالی این نمونه‌ها از مقادیر نمونه‌های شاهد و حداکثر مقدار استاندارد بیشتر می‌شود.



شکل ۷. مقادیر دانشیه مارشال در درصدهای مختلف افزودنی

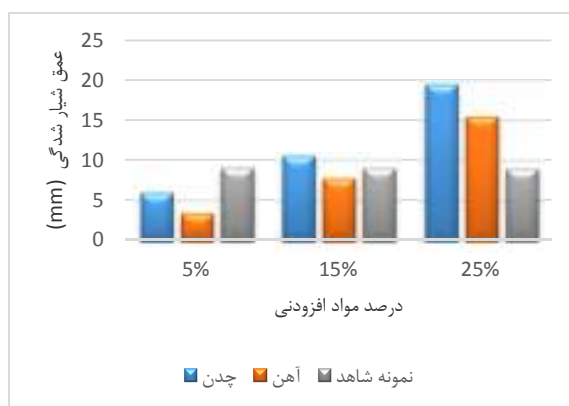


شکل ۸. مقادیر درصد فضای خالی آسفالت در درصدهای مختلف افزودنی

نتایج آزمایش شیارشدگی

است. به طور کلی می‌توان گفت که افزودن ۵٪ درصد براده آهن بهترین عملکرد را در کاهش مقاومت شیارشدگی داشته است. لازم به ذکر است از آنجا که براده آلومینیم عملکرد مناسبی در تغییر پارامترهای مخلوط آسفالتی نداشت، لذا از تهیه مخلوط‌های اصلاح شده با براده آلومینیم جهت انجام آزمایش مقاومت شیارشدگی و مقاومت اصطکاکی، صرف‌نظر شده است.

مقدار عمق شیارشدگی حاصل از آزمایش ویلتراک در نمودار شکل (۹) قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است، عمق شیارشدگی با افزودن براده‌های ضایعاتی در درصدها و افزودنی‌های مختلف رفتار متفاوتی دارد به طوری که به ازای ۵٪ براده‌های آهن و چدن مقدار عمق شیار برای هر دو نمونه اصلاح شده از حالت پایه کمتر شده است اما با اضافه کردن درصد براده‌های فلزی، مقدار عمق شیارشدگی افزایش یافته



شکل ۹. عمق شیارشدگی نمونه‌های مختلف آسفالتی

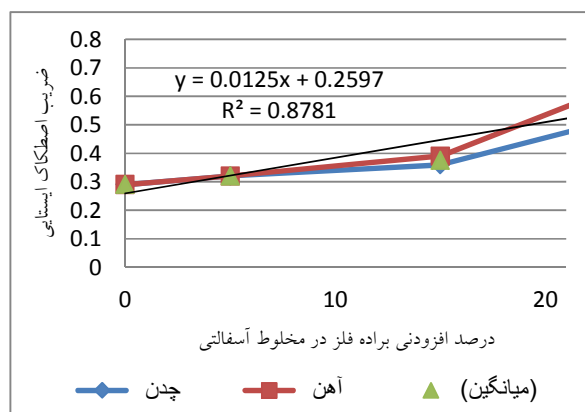
نتایج آزمایش مقاومت اصطکاکی

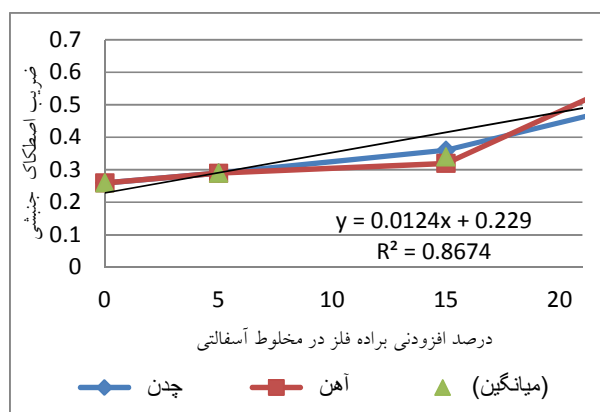
افزایش درصد براده‌ها، مقادیر ضریب اصطکاک جنبشی و ایستایی افزایش می‌یابد و در این میان براده آهن عملکرد بهتری در افزایش ضریب اصطکاک نمونه‌ها داشته است. (شکل (۱۰))

جدول (۴) ضرایب اصطکاک جنبشی و ایستایی حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که واضح است افزودن براده‌های فلزی آهن و چدن موجب افزایش ضرایب اصطکاک می‌شوند. به طوری که با

جدول ۴. مقادیر ضرایب اصطکاک غلتشی جنبشی و ایستایی نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای

ضریب اصطکاک ایستایی μ_s	ضریب اصطکاک جنبشی μ_k	نمونه‌ها
۰/۲۹	۰/۲۶	شاهد
۰/۳۲	۰/۲۹	نمونه حاوی ۵٪ آهن
۰/۳۹	۰/۳۲	نمونه حاوی ۱۵٪ آهن
۰/۶۸	۰/۶۴	نمونه حاوی ۲۵٪ آهن
۰/۳۲	۰/۲۹	نمونه حاوی ۵٪ چدن
۰/۳۶	۰/۳۲	نمونه حاوی ۱۵٪ چدن
۰/۵۵	۰/۵۳	نمونه حاوی ۲۵٪ چدن





شکل ۱۰. تغییرات ضریب اصطکاک غلتشی ایستایی و جنبشی نمونه‌های آسفالتی در مقابل تغییرات درصد افزودنی

۵- نتیجه‌گیری

شاهد است. اما استفاده از براده آلومینیم موجب افزایش فضای خالی مصالح شده است.

-درصد فضای خالی پر شده با قیر با افزودن براده‌های فلزی کاهش می‌یابد. به طوریکه کمترین درصد فضای خالی پر شده با قیر مربوط به نمونه‌های اصلاح شده با آلومینیم می‌باشد. به این صورت که با افزایش درصد براده آلومینیم میزان درصد فضای خالی پر شده با قیر کمتر می‌شود. برای نمونه‌های اصلاح شده با براده آهن و چدن روند ثابتی وجود ندارد. در ابتدا و در درصدهای ۵ تا ۱۵ درصد، فضای خالی پر شده با قیر برای نمونه‌های اصلاح شده با چدن بیشتر از آهن است. اما در درصدهای بالای آن، مقدار این پارامتر برای نمونه‌های اصلاح شده با براده آهن بزرگتر است. -افزودن براده‌های چدن و آهن مقدار فضای خالی مقدار فضای خالی آسفالت در نمونه‌های حاوی براده آلومینیم بیشتر از سایر نمونه‌ها است و با افزایش درصد این ماده، مقدار فضای خالی آسفالت بیشتر می‌شود.

-عمق شیارشدگی با افزودن براده‌های ضایعاتی در درصدها و افزودنی‌های مختلف رفتار متفاوتی دارد به طوری که به ازای ۵ درصد براده آهن و چدن مقدار عمق شیار برای هر دو نمونه اصلاح شده از حالت پایه کمتر شده است. اما با اضافه کردن درصد براده‌های فلزی، مقدار عمق شیارشدگی افزایش می‌یابد. به طور کلی افزودن ۵ درصد براده آهن، بهترین عملکرد را در کاهش مقاومت شیارشدگی داشته است.

-افزودن براده‌های آهن و چدن، ضرایب اصطکاک غلتشی

این پژوهش با هدف ارزیابی مخلوط‌های اصلاح شده با براده‌های فلزی به منظور بهبود پارامترهای مخلوط آسفالتی و افزایش مقاومت شیارشدگی و اصطکاک آنها و به‌علاوه کاهش تاثیرات زیست محیطی ناشی از دفع زباله‌های فلزی انجام گرفت که عمده نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشد.

-افزودن براده‌های فلزی منجر به افزایش استحکام نمونه‌ها شده است. با افزایش درصد براده‌های آهن و چدن استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین افزایش برای نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد براده آهن به میزان ۴۲/۴ درصد نسبت به نمونه‌های پایه بوده است. اما این روند برای نمونه‌های حاوی آلومینیم متفاوت است. به طوری که افزودن ۵ تا ۱۰ درصد آلومینیم باعث افزایش استحکام شده است. اما در درصدهای بالاتر، نرخ تغییرات نزولی است.

-افزودن چدن و آهن باعث کاهش نرمی مخلوط‌ها می‌شود. اما براده آلومینیم نرمی مخلوط‌ها را افزایش داده است. با افزایش درصد براده آهن و چدن مقدار نرمی کاهش می‌یابد و برعکس افزایش درصد آلومینیم منجر به افزایش نرمی شده است.

-فضای خالی مصالح نمونه‌های اصلاح شده با براده‌های آهن و چدن کاهش یافته است. به طوری که با افزایش مقدار براده آهن و چدن فضای خالی کمتر می‌شود. کاهش درصد فضای خالی برای نمونه‌های اصلاح شده با ۲۵ درصد چدنی و آهنی به ترتیب ۹/۸ و ۹/۰۴۴ درصد نسبت به نمونه‌های

-دیواندری، ح. و شعبانی، م. (۱۳۹۵)، "بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه"، کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم مهندسی، ترکیه، استانبول، دانشگاه استانبول.

-خبرگزاری مهر، (۱۳۹۶).

-عامری، م.، شفیع پور، ا. و احدی، م. (۱۳۹۱)، "بررسی میدانی و آزمایشگاهی تأثیر دانه بندی بر مقاومت اصطکاکی رویه های آسفالتی" فصلنامه علمی ترویجی جاده، دوره ۲۷، شماره ۷۱، ص ۱۶۳-۱۷۳.

-سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. (۱۳۹۰)، "آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (نشریه ۲۳۴)"، تجدید نظر اول، وزارت راه و شهرسازی، موسسه فیر و آسفالت- پژوهشکده حمل و نقل.

-عامری، م.، زارعی، ذ. و جهانیان، ح. (۱۳۸۷)، "بررسی کاربرد سرباره فولاد در مخلوط های آسفالتی گرم" چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

-عربانی، م. و میر عبد العظیمی، س. (۱۳۸۸)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر پودر آهن ضایعاتی در کاهش پدیده خزش روسازی های آسفالتی" هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز.

-فریدونی، ا. و دیواندری، ح. (۱۳۹۵)، "امکان سنجی استفاده از براده آهن ضایعاتی در ساخت مخلوط های آسفالت گرم (H.M.A)"، چهارمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

-میرعبدالعظیمی، س. و عربانی، م. (۱۳۹۰)، "ارزیابی آزمایشگاهی شیارشدگی در مخلوط های آسفالت شیشه ای" ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.

-نیازی، ی. (۱۳۹۰)، "مهندسی روسازی: اصول طراحی، تحلیل، تعمیر و نگهداری و بهسازی روسازی های آسفالتی"، مشهد: نشر نما: جهان فردا، چاپ اول.

ایستایی و جنبشی را افزایش می دهند. اما مشخص گردید که عملکرد براده آهن در افزایش ضریب اصطکاک نمونه های آسفالتی از براده های چدن بهتر است.

-به طور کلی می توان گفت که از میان براده های فلزی مورد استفاده، براده آهن بهترین عملکرد را در افزایش استحکام، ضرایب اصطکاک و کاهش عمق شیارشدگی داشته است.

۶-سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از پرسنل محترم مرکز تحقیقات فیر و مخلوط های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC)^۱ و آزمایشگاه روسازی دانشگاه آزاد واحد نوشهر، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

۷-پی نوشت ها

1. Performance
2. Flexible Pavements
3. Rutting
4. Permanent Deformation
5. Creep
6. Moisture Sensitivity of HMA
7. Modified Lott man
8. Moisture Damage
9. Atterberg Limits
10. Flow
11. Wheel Track
12. Void in Mineral Aggregate (VMA)
13. Void Filled with Asphalt (VFA)
14. Air void (V_a)
15. Asphalt Mixtures and Bitumen Research Center

۸-مراجع

-رضوان، م. و ایزدی، ا. (۱۳۹۴)، "بررسی اثر نانو اکسیدهای آهن و آلومینیوم بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم"، مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، دوره ۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، ص ۹۳-۱۰۲.

-زیاری، ح.، دیواندری، ح. و افشین، ا. (۱۳۹۶)، "ارزیابی عملکرد مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه و بازالت" فصلنامه علمی ترویجی جاده، دوره ۲۵، شماره ۹۲، پاییز ۱۳۹۶، ص ۶۱-۷۴.

- Giustozzi, F., Mansour, K., Patti, F., Pannirselvam, M., and Fiori, F. (2018) "Shear rheology and microstructure of mining material-bitumen composites as filler replacement in asphalt mastics", *Construction and Building Materials*, 171, pp. 726-735.
- Javilla, B., Mo, L., Hao, F., Shu, B., and Wu, S. (2017), "Significance of initial rutting in prediction of rutting development and characterization of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 153, pp. 157-164.
- Ziari, H., and Divandari, H. (2013), "Presenting asphalt mixtures flow number prediction model using gyratory curves", *International Journal of Civil Engineering*, 11(2), pp.125-133.
- Ajam, H., Gómez-Meijide, B., Artamendi, I., and Garcia, A. (2018), "Mechanical and healing properties of asphalt mixes reinforced with different types of waste and commercial metal particles", *Journal of Cleaner Production*, 192, pp. 138-150.
- Alataş, T., Yılmaz, M., and Kök, B. V. (2018), "Determination of the Resistance of Hot Mix Asphalt Samples Prepared under Different Conditions against Wheel Tracking", *Fırat University Turkish Journal of Science & Technology*, 13(1), pp.105-111.
- Domingos, M. D. I., Faxina, A. L., and Bernucci, L. L. B. (2017), "Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance", *Construction and Building Materials*, 144, pp. 207-213.