

ارزیابی عملکرد آسفالت گرم اصلاح شده با خاکستر پوسته برنج

حسن دیواندری*، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
سیدرضا سجادی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵

صفحه ۱۷۵-۱۹۴

چکیده

امروزه با افزایش میزان بار و حجم ترافیک عبوری از روسازی‌های آسفالتی، افزایش دوام و مقاومت این نوع مخلوط‌ها بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از عوامل مؤثر در افزایش کیفیت آسفالت تولیدی، به کارگیری فیلر مناسب می‌باشد. اگرچه فیلر در مقادیر کم برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، اما تأثیر بسزای آن کاملاً مشخص گردیده و تحقیقات وسیعی نیز در این مورد انجام شده است. فیلر به عنوان بخش ریزدانه، نقش مؤثری در خصوصیات مکانیکی و رفتاری مخلوط آسفالتی برعهده دارد و قفل و بست مصالح را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی، نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که اغلب خاکسترهای زیست‌توده دارای عناصر متعددی هستند که برای آسفالت مفیدند. خاکستر پوسته برنج که یک خاکستر زیست توده محسوب می‌شود یکی از محصولات ضایعاتی به دست آمده از کوره‌ها در نیروگاه‌ها است که در اثر سوختن پوسته برنج به دست می‌آید. در حال حاضر خاکستر پوسته برنج، به دلیل داشتن خصوصیات مفید در صنایع تولید بتن به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین بخشی از فیلر (پودر سنگ) در مخلوط آسفالتی گرم استفاده شد. ابتدا نمونه‌های مارشال برای تعیین میزان قیر بهینه بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ و ۵ در درصد‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد خاکستر پوسته برنج، جایگزین پودر سنگ به عنوان فیلر، ساخته شد. سپس نمونه‌های جدیدی با درصد قیر بهینه به دست آمده و بر اساس دانه‌بندی‌های قبلی آماده شد. در پایان میزان تأثیر استفاده از خاکستر پوسته برنج در پدیده‌ی شیارشدگی، حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از این افزودنی به میزان بهینه، عملکرد آسفالت را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، خاکستر پوسته برنج، حساسیت رطوبتی، مدول بر جهندگی، شیارشدگی

۱- مقدمه

سه بخش پرکننده^۱، قیر و سنگدانه‌ها تشکیل شده است و به منظور افزایش پیوند میان سنگدانه‌ها، ماستیک حاصل از اختلاط فیلر و قیر بین سنگدانه‌ها را پر می‌کند. (Li et al., 2017) فیلر به عنوان بخش ریزدانه، نقش مؤثری در خصوصیات مکانیکی و رفتار شیمیایی قیر در مخلوط آسفالتی برعهده دارد و بر اتصال و قفل و بست مصالح تأثیرگذار است. (Muniandy et al., 2013) فیلرها از نظر دانه‌بندی،

امروزه از انواع مخلوط‌های آسفالتی به دلیل عملکرد و سرویس‌دهی مناسب، تأمین رانندگی نرم و راحت، استقامت و دوام بالا به طور گسترده در ساخت روسازی‌ها استفاده می‌گردد. (Mehmet et al., 2011) در واقع هدف اصلی از ساخت رویه‌های آسفالتی هم ایجاد یک بستر مناسب و رضایت‌بخش است که رانندگان وسائط نقلیه بتوانند به راحتی از آن استفاده کنند. (Chen et al., 2011) مخلوط آسفالتی از

شکل ذرات، حجم فضای خالی، ترکیب مواد معدنی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌باشند. بنابراین انتخاب فیلر مناسب در مخلوط آسفالتی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد (مدرس و رحمان‌زاده، ۱۳۹۵). از طرفی، در حال حاضر به دلیل کمبود و محدودیت منابع طبیعی موجود، تقاضای گسترده‌ای برای استفاده از مواد ضایعاتی^۲ در صنعت راهسازی وجود دارد. جایگزینی بخش‌های مختلف سنگدانه‌های معمولی مورد استفاده در مخلوط آسفالتی با مواد و مصالح ضایعاتی، یک روش کارا با هدف کاهش هزینه‌ها و بهبود خصوصیات روسازی است. در سال‌های اخیر نیز مطالعات زیادی در مورد استفاده از مواد ضایعاتی مختلف برای جایگزینی فیلرهای رایج در مخلوط آسفالتی انجام شده است. (De Assis et al., 2017) (Sangiorgi et al., 2017) بررسی پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که فرآیند سوختن سوخت‌های زیستی^۳ به افزایش اثرات گلخانه‌ای که ناشی از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در اتمسفر است، دامن نمی‌زند. (Stanislav et al., 2010) زیست‌توده‌ها به‌طور تقریبی حدود ۱۰ درصد انرژی موردنیاز جهان را برای تولید گرما و الکتریسیته تأمین می‌کنند. (Jordan and Akay, 2012) خاکستر پوسته برنج که یک خاکستر زیست توده^۴ محسوب می‌شود یکی از محصولات ضایعاتی بدست آمده از کوره‌ها در نیروگاه‌ها است که در اثر سوختن پوسته برنج به‌دست می‌آید. در حال حاضر خاکستر پوسته برنج، به دلیل داشتن خصوصیات مفید در صنایع تولید بتن به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و این پتانسیل را دارد که به شکل وسیع در صنعت روسازی نیز به عنوان فیلر مورد استفاده قرار گیرد. (Goh et al., 2014)

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات و تحقیقات مختلف نشان داده است که فیلر به عنوان بخشی از مصالح آسفالتی، نقش محسوسی بر رفتار و مشخصات مکانیکی و نسبت‌های حجمی مخلوط‌های آسفالتی دارد. فیلر علاوه بر این که همانند ماده‌ای خنثی، نقش پرکننده را در مخلوط دارد، به دلیل دانه‌بندی بسیار ریز و بافت سطحی خاص، می‌تواند اندرکنش شدیدی با فیلر داشته باشد و با تقویت خاصیت چسبندگی، رفتار مکانیکی مخلوط را بهبود بخشد (غفارپور جهرمی و خدایی، ۱۳۸۸) مهم‌ترین نقش فیلر

در مخلوط آسفالتی افزایش عمر روسازی و ازدیاد مقاومت آن در برابر نفوذ آب است. استفاده از فیلر در آسفالت سبب ازدیاد قدرت باربری، کاهش تغییر شکل نسبی، افزایش مقاومت در برابر ضربه، افزایش مقاومت برشی و فشاری، افزایش کندروانی فیلر و کاهش شکنندگی آن می‌شود، ضمن اینکه مصرف زیاد فیلر در بتن آسفالتی باعث سخت‌شدن مخلوط و مشکل‌شدن عملیات تراکم می‌گردد، به‌طوری که اگر فیلر را بدون افزایش فیلر استفاده نمایند، مقاومت مارشال کاهش می‌یابد (زارعی و همکاران، ۱۳۹۴). در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای به‌منظور ارزیابی تأثیر فیلر در خواص و رفتار آسفالت با به‌کارگیری مصالح متنوع انجام گرفته است. تمام تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه به علت جایگزینی آسان‌تر این بخش از مخلوط نسبت به سایر مصالح و نیز حجم کم و مؤثر این ماده در رفتار و عملکرد مخلوط آسفالتی می‌باشد (زارعی، ملکی و الیاسی، ۱۳۹۴) تحقیقات بسیاری در مخلوط‌های آسفالتی برای جایگزین کردن فیلرهای معدنی سستی (پودر سنگ) با مصالح دیگر برای ایجاد عملکرد بهتر و ساختار روسازی انعطاف‌پذیر و اقتصادی‌تر انجام شد. (Karas'ahin and Terzi, 2007) (West and James, 2005; Xue et al., 2005 and Borhan et al., 2010). یکی از این مواد، خاکسترهای زیست توده هستند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اغلب خاکسترهای زیست‌توده دارای عناصر متعددی هستند که در عملکرد آسفالت مفیدند. (Bhattacharya et al., 2003) سارگین و همکارانش در سال ۲۰۱۳، تحقیقی در مورد استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان فیلر انجام دادند. خاکستر پوسته‌ی برنج حاصل از احتراق در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتیگراد در کوره، جایگزین فیلر پودر سنگ آهک به میزان ۵ درصد در نسبت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد شد و با مقایسه‌ی نتایج، نسبت جایگزینی بهینه‌ی خاکستر پوسته‌ی برنج تعیین گردید. نتایج حاصل از آن نشان داد که مخلوط‌هایی که از ۵۰ درصد خاکستر پوسته‌ی برنج و ۵۰ درصد فیلر سنگ آهک (یعنی فیلر حاوی ۲/۵ درصد خاکستر پوسته‌ی برنج و ۲/۵ درصد پودر سنگ‌آهک) استفاده نمودند، هنگام ارزیابی بر اساس استقامت مارشال، بهترین استقامت را داشته‌اند. همچنین به عنوان یک نتیجه مشخص شد می‌توان از خاکستر پوسته برنج به ویژه در مناطقی که ماده‌ی زائد خاکستر پوسته‌ی برنج به‌طور گسترده‌ای وجود دارد، به جای پودر سنگ آهک در

مخلوط‌های آسفالتی به عنوان فیلر معدنی استفاده نمود. (Sargin et al., 2013) در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۴ از خاکستر پسته برنج به‌عنوان جایگزین بخشی از فیلر سیمان در مخلوط آسفالتی گرم استفاده شد. در این تحقیق نمونه‌های آسفالتی با فیلر خاکستر پسته برنج با نسبت‌های ۰، ۵، ۷/۵، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵ و ۲۵ درصد جایگزینی با فیلر سیمان، ساخته شد و قیر بهینه تعیین گردید. نتایج نشان داد که پارامترهای مارشال برای نمونه‌هایی که فیلر آن با ۱۰٪ خاکستر پسته برنج و ۹۰٪ سیمان پرتلند معمولی (OPCA) و با قیر بهینه ۵/۵ درصد ساخته شدند، با الزامات آیین‌نامه همخوانی دارد. (Abulfatai Adinoyi and Lawal, 2014). الحذبى در سال ۲۰۱۶ از خاکستر پسته برنج به‌عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم استفاده نمود و نتایج آن را با نمونه‌های ساخته شده با فیلر سیمان، مقایسه کرد. نتایج نشان داد که مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته شده با فیلر خاکستر پسته برنج نسبت به نمونه‌های شاهد، تا ۶۵ درصد افزایش داشته است. همچنین از آزمایش‌های حساسیت رطوبتی و پیرشدگی مشخص شد، فیلر خاکستر پسته برنج باعث بهبود مشخصات مکانیکی، افزایش عمر پیرشدگی ۹ و دوام مخلوط آسفالتی شده است. (Al-Hdabi, 2016) در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۷ تأثیر خاکستر پسته برنج و سرباره به‌عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی و عملکرد آن‌ها با فیلر پودر سنگ مورد مقایسه قرار گرفت. در این تحقیق نمونه‌های آسفالتی با فیلرهای ذکر شده ساخته شدند و آزمون مارشال بر روی آن‌ها انجام شد. از نتایج مشخص شد که مخلوط‌های ساخته شده با فیلر خاکستر پسته برنج به ترتیب از مخلوط‌های ساخته شده با فیلر سرباره و فیلر پودر سنگ از استحکام مارشال بیشتری برخوردار بودند. (Akter and Hossain, 2017)

۳- اهمیت موضوع

با توجه به حجم بسیار زیاد استفاده از مصالح سنگی که عمدتاً از معادن کوهی یا رودخانه‌ای تأمین می‌شود، بکارگیری مصالح بازیافتی، ضایعاتی و پسماندها در فعالیت‌های عمرانی، صنعتی و ... از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. در مناطق شمالی ایران، پسته برنج به عنوان یک ماده ضایعاتی به

وفور یافت می‌شود. لذا در این تحقیق از خاکستر پسته برنج به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح فیلر (پودر سنگ) در مخلوط آسفالتی گرم استفاده شد و میزان اثرگذاری استفاده از آن در خرابی شیارشدگی^۵، حساسیت رطوبتی^۶ و مدول برجهنگی^۷ مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفت.

۴- فرضیات تحقیق

در این تحقیق فرض بر این است که با استفاده از مصالح سنگی و قیر موجود و با ثابت نگه داشتن نوع دانه‌بندی و با تغییر نوع فیلر و قیر بهینه مربوط به آن می‌توان خواص مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشید. ضمناً مطابق استاندارد ASTM در محاسبه مدول برجهنگی، ضریب پواسون (μ) برابر ۰/۳۵ فرض شده است.

۵- روش تحقیق

در این پژوهش پس از تهیه مصالح سنگی، قیر و خاکستر پسته برنج، با ترکیب‌های متفاوت خاکستر پسته برنج، نمونه‌های آسفالتی ساخته شد. پس از تعیین قیر بهینه مخلوط‌ها، نمونه‌های دیگری با قیر بهینه هر ترکیب ساخته شد. در ادامه آزمایش‌های مدول برجهنگی، حساسیت رطوبتی و شیار شدگی برای ترکیب‌های مختلف انجام شد و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

۵-۱- مصالح و آزمایش‌های مربوطه

مصالح مورد استفاده در ساخت مخلوط آسفالتی گرم شامل سه بخش مصالح سنگدانه‌ای (ریز و درشت‌دانه)، قیر و فیلر است. با انجام آزمایش‌های مربوط به مصالح سنگی و قیر، ویژگی‌های مصالح سنگدانه‌ای، قیر و فیلرهای مصرفی تعیین شده که در ادامه مشخصات آنها بیان خواهد شد.

۵-۱-۱- مشخصات سنگدانه‌ها و دانه‌بندی مورد استفاده

برای تهیه نمونه‌های آسفالتی این پژوهش از سنگدانه‌های شکسته معدن شرکت پونل در شهرستان نور استفاده شد. در این تحقیق از حد وسط دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ و ۵ مخلوط‌های آسفالتی نشریه ۲۳۴ استفاده شد که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه گردیده است. همچنین ویژگی‌های مصالح سنگی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ و ۵ مخلوط‌های آسفالتی گرم (نشریه ۲۳۴)

اندازه الک		حد بالا و پائین دانه‌بندی (درصد)		حد متوسط درصد عبوری (دانه‌بندی مورد نظر)
(میلیمتر)	دانه‌بندی شماره ۴	دانه‌بندی شماره ۵	دانه‌بندی شماره ۴	دانه‌بندی شماره ۵
۱۹	۱۰۰	----	۱۰۰	----
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۱۰۰
۹/۵	----	۹۰-۱۰۰	----	۹۵
۴/۷۵	۴۴-۷۴	۵۵-۸۵	۵۹	۷۰
۲/۳۶	۲۸-۵۸	۳۲-۶۷	۴۳	۴۹/۵
۰/۳	۵-۲۱	۷-۲۳	۱۳	۱۵
۰/۰۷۵	۲-۱۰	۲-۱۰	۶	۶

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

استاندارد آزمایش		حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
ASTM	AASHTO	رویه	آستر		
C131	T96	۲۵	۳۰	۲۳	حداکثر سایش به روش لس آنجلس (درصد)
D4791	--	۱۵	۱۵	۰/۷	حداکثر سنگدانه‌های پهن و دراز (درصد)
D5821	--	۹۰	۸۰	۹۱	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در دو وجه
C88	T104	۸	۸	۰/۱۲	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (مصالح درشت‌دانه)
C88	T104	۱۲	۱۲	۰/۱۵	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (مصالح ریزدانه)
C127	T85	۲/۵	۲/۵	۲/۱	حداکثر جذب آب مصالح درشت‌دانه (درصد)
C128	T84	۲/۵	۲/۸	۲/۳	حداکثر جذب آب مصالح ریزدانه (درصد)

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر مصرفی در این تحقیق

نوع آزمایش	استاندارد	واحد	نتایج آزمایش
وزن مخصوص در دمای ۲۵ °C	ASTM D70	gr/cm ³	۱/۰۱۹
درجه نفوذ در ۲۵ °C	ASTM D5	°C	۶۷
درجه اشتعال	ASTM D92	°C	۳۱۰
مقدار کشش قیر در ۲۵ °C	ASTM D113	cm	بیشتر از ۱۰۰
نقطه نرمی	ASTM D36	°C	۴۹/۸

۵-۱-۲- قیر و مشخصات فنی آن

قیر مصرفی در این تحقیق، قیر خالص ۷۰-۶۰ بوده که از شرکت قیران پخش ستاره ایرانیان تهران تهیه گردیده و مشخصات فیزیکی آن در جدول (۳) آمده است.

۵-۱-۳- فیلر

گرفت. همین‌طور فیلر خاکستر پوسته برنج که جایگزین بخشی یا کل فیلر کنترل شد و سپس عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با این دو نوع فیلر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن مقایسه شد. وزن مخصوص فیلهای استفاده شده در این تحقیق در جدول (۴) نشان داده شده است. در ادامه توضیحاتی درباره ویژگی‌های خاکستر پوسته برنج و روش تهیه آن ارائه شده است.

در این پژوهش از دو نوع فیلر در ساخت مخلوط آسفالتی استفاده شد. فیلر پودر سنگ که از شکستن و آسیاب کردن سنگدانه‌ها به دست آمد و به‌عنوان فیلر کنترل مورد استفاده قرار

جدول ۴. وزن مخصوص فیلر

نوع فیلر	پودر سنگ	خاکستر پوسته برنج
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۲/۶۲۸	۲/۰۹

۵-۱-۳-۱- خاکستر پوسته برنج

فرآورده با ارزش و در واقع یک ماده خام صنعتی با قابلیت‌های متنوع محسوب می‌شود. (رمضانیانپور و همکاران، ۱۳۸۸) در قدیم پوسته برنج به‌عنوان منبع انرژی و با توجه به قابلیت اشتعال مناسب آن به‌عنوان سوخت در فعالیت‌هایی مانند پروسه خشک نمودن برنج، کارخانه‌های آجریزی، گرمایش خانگی و ... مورد استفاده قرار می‌گرفته است. در سال ۱۹۷۲ محققان به این نکته پی بردند که احتراق پوسته برنج در شرایط کنترل شده منجر به تولید خاکستر سیلیس سفید رنگی با درصد خلوص زیاد خواهد شد که از خواص پوزولانی بسیار مناسبی برخوردار است. همین‌طور مشخص شد که قدرت گرمادهی هر کیلو پوسته برنج طبق مطالعات انجام شده معادل ۱۶۷۲۰ کیلو ژول می‌باشد. (اکبرزاده، ۱۳۹۴)

در حال حاضر اصلی‌ترین کاربرد پوسته برنج استفاده از آن به‌عنوان سوخت در نیروگاه‌های برق است. این فرآیند باعث تولید حجم زیادی RHA می‌شود که معمولاً دپو شده یا در رودخانه‌ها ریخته و باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی می‌شود. فعالیت پوزولانی خاکستر پوسته برنج، به شدت وابسته به شرایط سوزاندن، میزان دما و زمان سوختن است. (Ramezaniapour, 2014). در این پژوهش پوسته برنج از یک کارخانه شالیکوبی محلی واقع در شهرستان نور تهیه گردید. ابتدا پوسته برنج در یک فضای باز سوزانده شد و سپس برای کربن‌زدایی محصول حاصل شده در پارک علم و

پوسته برنج یک محصول ضایعاتی است که در فرآیند تولید برنج به دست می‌آید. از شلتوک برنج در طول عمل شالیکوبی در دستگاه‌های پوست‌کن و سفید کن برنج، ۷۸ درصد وزنی برنج، برنج خردشده و سبوس و ۲۲ درصد باقی‌مانده به شکل پوسته برنج حاصل می‌شود. با سوزاندن پوسته برنج، حدود ۷۵ درصد وزن آن به‌صورت مواد آلی فرار درآمده و تنها ۲۵ درصد باقی‌مانده به خاکستر تبدیل می‌شود. این خاکستر، به‌عنوان خاکستر پوسته برنج (RHA^{11}) شناخته می‌شود. (Khan et al., 2012) شلتوک برنج دارای دو پوسته داخلی و بیرونی است. پوسته داخلی بسیار نازک است و سبوس برنج نام دارد و برای مصارف خوراکی بسیار مفید است. پوسته بیرونی که همان پوسته برنج یا پوسته شلتوک می‌باشد، قدری ضخیم‌تر است و مناسب برای تغذیه نیست. پوسته برنج به‌طور کلی، به دلیل این‌که سلولز و سایر مواد قندی آن کم است، حتی به‌عنوان غذای چارپایان نیز توصیه نمی‌شود. (Gupta, 2013) با توجه به فراوانی شالیزارهای شمال ایران و میزان تولید برنج در این ناحیه و نواحی دیگر کشور، سالیانه مقدار زیادی پوسته برنج در ایران تولید می‌شود و از این پوسته‌ها استفاده چندانی نمی‌شود و یا در مواردی اندک استفاده‌های بسیار محدودی دارد و بحث خارج کردن آن‌ها از محیط زیست نیز با مشکلات عدیده‌ای روبه‌رو است. این در حالی است که پوسته برنج یک

فناوری گیلان در کوره‌ی مخصوص سوزاندن پوسته برنج با دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه سوزانده شد. خاکستر به دست آمده برای دستیابی به اندازه دانه‌بندی مورد نظر (کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر) به مدت یک ساعت آسیاب

شد. مشخصات شیمیایی RHA در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی RHA بر اساس میزان دما و مدت زمان سوختن (رمضانیاپور و همکاران، ۱۳۸۷)

LOI	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	میزان دما و زمان سوختن	
۳۱/۰۱	۰/۰۱	۰/۵۱	۱/۴۷	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۵۷	۰/۱۴	۰/۰۵	۷۵/۲۲	۶۰ دقیقه	۵۵۰°C
۱۴/۹۵	۰/۰۱	۰/۷۹	۱/۷۲	۰/۰۵	۰/۴۳	۰/۲۳	۰/۶۶	۰/۰۹	۰/۰۳	۸۰/۷۶	۹۰ دقیقه	
۱۵/۳۳	۰/۰۲	۰/۴۴	۱/۶۵	۰/۰۶	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۵۹	۰/۲۴	۰/۰۲	۸۰/۵۵	۶۰ دقیقه	۶۰۰°C
۹/۸۱	۰/۰۲	۰/۴۸	۱/۵۳	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۲۲	۰/۸۷	۰/۱۵	۰/۰۶	۸۵/۶۰	۹۰ دقیقه	
۱۹/۵۳	۰/۰۱	۰/۵۲	۱/۶۹	۰/۰۸	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۸۶	۰/۲۲	۰/۰۸	۷۶/۲۱	۳۰ دقیقه	۶۵۰°C
۵/۹۱	۰/۰۲	۰/۴۱	۱/۵۸	۰/۰۷	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۹۱	۰/۲۲	۰/۰۴	۸۹/۶۱	۶۰ دقیقه	
۵/۴۸	۰/۰۲	۰/۵۶	۱/۵۱	۰/۰۸	۰/۴۹	۰/۲۵	۰/۸۵	۰/۲۷	۰/۰۶	۹۰/۲۱	۹۰ دقیقه	
۱۴/۵۳	۰/۰۲	۰/۵۳	۱/۷۲	۰/۰۸	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۷۷	۰/۱۵	۰/۰۹	۸۱/۳۵	۳۰ دقیقه	۷۰۰°C
۶/۰۱	۰/۰۲	۰/۵۵	۱/۴۸	۰/۰۹	۰/۳۹	۰/۱۴	۰/۸۸	۰/۱۱	۰/۰۶	۸۹/۹۳	۶۰ دقیقه	
۴/۱۴	۰/۰۱	۰/۴۱	۱/۶۴	۰/۰۵	۰/۴۱	۰/۰۹	۰/۷۱	۰/۱۰	۰/۰۹	۹۲/۱۹	۹۰ دقیقه	
۱۲/۰۹	۰/۰۲	۰/۶۱	۱/۳۵	۰/۰۶	۰/۳۸	۰/۱۷	۰/۵۴	۰/۱۸	۰/۰۹	۸۴/۲۲	۳۰ دقیقه	۷۵۰°C
۲/۶۷	۰/۰۲	۰/۶۳	۱/۶۹	۰/۰۶	۰/۴۴	۰/۱۱	۰/۶۷	۰/۲۷	۰/۰۸	۹۳/۱۱	۶۰ دقیقه	
۰/۸۴	۰/۰۱	۰/۴۵	۱/۶۱	۰/۰۹	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۷۸	۰/۱۱	۰/۰۴	۹۵/۳۱	زمان ناچیز	۱۱۰۰°C

۵-۲- ساخت نمونه‌ها، طرح اختلاط و انجام آزمایش‌ها

۵-۲-۱- ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق جهت طرح اختلاط از روش مارشال مطابق استاندارد ASTM-D1559 استفاده شد. نمونه‌ها بر اساس حد وسط دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ و ۵ مخلوط آسفالتی گرم نشریه ۲۳۴ و با درصد قیرهای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد و با جایگزینی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد افزودنی RHA به جای فیلر پودر سنگ، برای ترافیک سنگین ساخته شدند. تعداد ۱۸۰ نمونه آسفالتی (شش درصد قیر، تعداد سه نمونه برای هر درصد قیر، پنج ترکیب مختلف فیلر و دو نوع دانه‌بندی) آماده و آزمایش‌های استقامت مارشال، روانی، وزن مخصوص و رایس برای تعیین میزان قیر بهینه ۱۰ ترکیب انجام شد. سپس با قیر بهینه به دست آمده برای ۱۰ ترکیب مختلف از نمونه‌ها و با دانه‌بندی که در ساخت اولیه نمونه استفاده گردید، مجدداً نمونه‌های آسفالتی جهت انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی، شیارشدگی و حساسیت رطوبتی ساخته شدند.

۵-۲-۲- آزمایش‌های مارشال

یکی از پارامترهای اساسی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی استقامت مارشال می‌باشد. در این آزمایش استقامت مارشال که

معرف بیشترین مقاومتی است که نمونه بدون گسیختگی می‌تواند تحمل کند و روانی مارشال که بیانگر میزان تغییرشکلی که در نمونه در لحظه شکست رخ می‌دهد، از دستگاه مارشال به دست می‌آید. پس از تعیین وزن مخصوص مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در آب $60 \pm 1^\circ\text{C}$ قرار گرفته و بعد از آن بلافاصله مقدار استحکام و روانی آن به وسیله دستگاه جک مارشال بر اساس روش استاندارد ASTM-D1559 تعیین می‌شود. در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال، مقادیر وزن مخصوص حقیقی مخلوط آسفالتی، وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی، حداکثر وزن مخصوص مخلوط آسفالتی، استحکام مارشال و روانی مخلوط آسفالتی متراکم شده تعیین می‌گردد. سایر کمیت‌های مورد نظر با استفاده از روابط لازم تعیین می‌گردند. (فیروزئی و همکاران، ۲۰۱۱). جدول (۶) مشخصات وزنی مصالح سنگی و درصد قیر، به همراه نام هر یک از نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. در نامگذاری نمونه‌ها، عدد قرار گرفته پس از حرف R نشان دهنده درصد خاکستر پوسته برنجی است که جایگزین فیلر نمونه شده است. عدد بعدی درصد وزنی قیر نمونه است. لازم به ذکر است چون حد وسط مقدار فیلر در دو دانه‌بندی ۴ و ۵، شش درصد می‌باشد، جدول (۶) برای هر دو دانه‌بندی قابل استفاده خواهد بود.

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های آسفالتی

نام نمونه	مقدار RHA (%)	وزن RHA (gr)	فیلر پودر سنگ (%)	فیلر پودر سنگ (gr)	وزن مصالح سنگی (gr)	مقدار قیر (%)	وزن قیر (gr)	وزن نمونه (gr)
R0-4	۰	۰	۱۰۰	۷۲	۱۲۰۰	۴/۰	۵۰/۰۰	۱۲۵۰/۰۰
R25-4	۲۵	۱۸	۷۵	۵۴	۱۱۸۲	۴/۰	۵۰/۰۰	۱۲۵۰/۰۰
R50-4	۵۰	۳۶	۵۰	۳۶	۱۱۶۴	۴/۰	۵۰/۰۰	۱۲۵۰/۰۰
R75-4	۷۵	۵۴	۲۵	۱۸	۱۱۴۶	۴/۰	۵۰/۰۰	۱۲۵۰/۰۰
R100-4	۱۰۰	۷۲	۰	۰	۱۱۲۸	۴/۰	۵۰/۰۰	۱۲۵۰/۰۰
R0-4.5	۰	۰	۱۰۰	۷۲	۱۲۰۰	۴/۵	۵۶/۵۴	۱۲۵۶/۵۴
R25-4.5	۲۵	۱۸	۷۵	۵۴	۱۱۸۲	۴/۵	۵۶/۵۴	۱۲۵۶/۵۴
R50-4.5	۵۰	۳۶	۵۰	۳۶	۱۱۶۴	۴/۵	۵۶/۵۴	۱۲۵۶/۵۴
R75-4.5	۷۵	۵۴	۲۵	۱۸	۱۱۴۶	۴/۵	۵۶/۵۴	۱۲۵۶/۵۴
R100-4.5	۱۰۰	۷۲	۰	۰	۱۱۲۸	۴/۵	۵۶/۵۴	۱۲۵۶/۵۴
R0-5	۰	۰	۱۰۰	۷۲	۱۲۰۰	۵/۰	۶۳/۱۶	۱۲۶۳/۱۶
R25-5	۲۵	۱۸	۷۵	۵۴	۱۱۸۲	۵/۰	۶۳/۱۶	۱۲۶۳/۱۶
R50-5	۵۰	۳۶	۵۰	۳۶	۱۱۶۴	۵/۰	۶۳/۱۶	۱۲۶۳/۱۶
R75-5	۷۵	۵۴	۲۵	۱۸	۱۱۴۶	۵/۰	۶۳/۱۶	۱۲۶۳/۱۶
R100-5	۱۰۰	۷۲	۰	۰	۱۱۲۸	۵/۰	۶۳/۱۶	۱۲۶۳/۱۶
R0-5.5	۰	۰	۱۰۰	۷۲	۱۲۰۰	۵/۵	۶۹/۸۴	۱۲۶۹/۸۴
R25-5.5	۲۵	۱۸	۷۵	۵۴	۱۱۸۲	۵/۵	۶۹/۸۴	۱۲۶۹/۸۴
R50-5.5	۵۰	۳۶	۵۰	۳۶	۱۱۶۴	۵/۵	۶۹/۸۴	۱۲۶۹/۸۴
R75-5.5	۷۵	۵۴	۲۵	۱۸	۱۱۴۶	۵/۵	۶۹/۸۴	۱۲۶۹/۸۴
R100-5.5	۱۰۰	۷۲	۰	۰	۱۱۲۸	۵/۵	۶۹/۸۴	۱۲۶۹/۸۴
R0-6	۰	۰	۱۰۰	۷۲	۱۲۰۰	۶/۰	۷۶/۶۰	۱۲۷۵/۶
R25-6	۲۵	۱۸	۷۵	۵۴	۱۱۸۲	۶/۰	۷۶/۶۰	۱۲۷۵/۶
R50-6	۵۰	۳۶	۵۰	۳۶	۱۱۶۴	۶/۰	۷۶/۶۰	۱۲۷۵/۶
R75-6	۷۵	۵۴	۲۵	۱۸	۱۱۴۶	۶/۰	۷۶/۶۰	۱۲۷۵/۶
R100-6	۱۰۰	۷۲	۰	۰	۱۱۲۸	۶/۰	۷۶/۶۰	۱۲۷۵/۶
R0-6.5	۰	۰	۱۰۰	۷۲	۱۲۰۰	۶/۵	۸۳/۴۲	۱۲۸۳/۴۲
R25-6.5	۲۵	۱۸	۷۵	۵۴	۱۱۸۲	۶/۵	۸۳/۴۲	۱۲۸۳/۴۲
R50-6.5	۵۰	۳۶	۵۰	۳۶	۱۱۶۴	۶/۵	۸۳/۴۲	۱۲۸۳/۴۲
R75-6.5	۷۵	۵۴	۲۵	۱۸	۱۱۴۶	۶/۵	۸۳/۴۲	۱۲۸۳/۴۲
R100-6.5	۱۰۰	۷۲	۰	۰	۱۱۲۸	۶/۵	۸۳/۴۲	۱۲۸۳/۴۲

۵-۲-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی

ناشی از پیوند بین سطح سنگدانه و قیر) به وجود می‌آید. مقاومت کششی به‌وسیله حداکثر باری که نمونه قبل از گسیختگی می‌تواند تحمل کند، محاسبه می‌شود. تأثیر آب در کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی یکی از نگرانی‌های اصلی در طرح اختلاط آسفالت است که تحت عنوان حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (بهبهانی، ایازی و شجاعی، ۱۳۹۴).

حساسیت رطوبتی موجب کاهش چسبندگی و به‌طور چشمگیری باعث تأثیرات نامطلوب در مقاومت مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین می‌تواند باعث خرابی‌های زودرس مانند شیارشدگی، عریان‌شدگی^{۱۱} و ... شود. (Park et al., 2017). آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم به‌منظور تعیین استحکام کششی مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌شود. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی به‌وسیله مقاومت پیوستگی قیر(مقاومت

۵-۲-۴- آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی مخلوطهای آسفالتی که طبق استاندارد ASTM D4123 به روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود، یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی خصوصیات الاستیک مصالح است. مدول برجهندگی، مدول ارتجاعی در بارگذاری دوره‌ای با کرنش‌های بسیار کوچک و یکی از مشخصه‌های مکانیکی مهم مخلوطهای آسفالتی است. به‌طور کلی رفتار مخلوطهای آسفالتی در سیستم روسازی راه، ویسکوالاستیک^{۱۲} بوده و تابع سرعت بارگذاری، شدت آن و درجه حرارت می‌باشد. اگر بار در مقایسه با مقاومت مصالح، کوچک باشد و در طی دوره زمانی طولانی تکرار گردد، تغییر شکل، تحت هر تکرار بار، تقریباً به‌طور کامل برگشت‌پذیر خواهد بود (یوسف‌دوست و همکاران، ۱۳۹۰). آزمایش مدول برجهندگی با استفاده از دستگاه UTM-5P مرکز تحقیقات قیر و مخلوطهای آسفالتی دانشگاه علم و صنعت انجام شد. شکل بارگذاری نیمه‌سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، تعداد پیش‌بارگذاری ۵۰ سیکل، تعداد پالس آزمایش ۵ سیکل، آزمایش برای هر نمونه در یک سطح تنش (۳۰ درصد مقاومت کششی در شرایط دمایی و عمر مشابه) انجام شد. همچنین برای هر نمونه مشابه، آزمایش دو بار تکرار شده و از میانگین نتایج در محاسبات استفاده شده‌است. ضریب پواسون ۰/۳۵ انتخاب گردید و آزمایش در دمای ثابت ۲۵°C انجام گرفت.

۵-۲-۵- آزمایش شیار جای چرخ

شیارشدهگی در روسازی‌های آسفالتی به‌صورت فرورفتگی‌های طولی در زیر مسیر چرخ‌ها نمایان شده و با برآمدگی‌های کناره همراه است. شیارشدهگی عمر خدمت‌دهی مفید روسازی را کاهش داده و با تحت تأثیر قراردادن امکان کنترل وسیله نقلیه، خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد می‌کند. این پدیده می‌تواند ظرفیت زهکشی سطح روسازی را کاهش دهد. افزایش عمق شیار منجر به ایجاد مشکلات زیادی در ایمنی راه‌ها می‌شود. هنگامی که عمق شیارشدهگی در حدود ۵ میلیمتر است، آب را در خود نگه داشته و در نتیجه پتانسیل وقوع هیدروپلانینگ افزایش می‌یابد. (گلشنی، قلعه نوی و

روش استاندارد AASHTO T283 یکی از معمول‌ترین آزمون‌ها جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی است. این آزمون بر روی نمونه‌های متراکم‌شده با درصد فضای خالی 7 ± 0.5 انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه‌ها برای هر مخلوط شش عدد است. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شوند که ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد زیر شرایط خلاء قرار می‌گیرند. نمونه‌های اشباع‌شده، در فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد برای ۱۶ ساعت و سپس در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند. در نهایت نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته و مابقی نمونه‌ها به درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شوند. هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام مقاومت کششی غیر مستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت (۵۰mm/min) قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود. بعد از تعیین مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$ITS = \frac{2000 P}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

که در این رابطه:

ITS: مقاومت کششی بر حسب کیلوپاسکال،

P: بیشینه بار بر حسب نیوتن،

D: قطر نمونه بر حسب میلیمتر،

t: ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر می‌باشد.

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت را با TSR بر حسب درصد نشان می‌دهند که بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود. مقدار ITS در رابطه (۲) مقدار میانگین برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار TSR باید ۷۵ درصد باشد و هر چه مقدار TSR بالاتر باشد نشان‌دهنده مقاومت بالاتر در برابر رطوبت است. (عامری و همکاران، ۱۳۹۳)

$$TSR = \frac{ITS_{خشک}}{ITS_{اشباع}} \quad (2)$$

صحاف، ۲۰۱۵) از این رو بررسی این پدیده در مخلوط‌های آسفالتی دارای اهمیت فراوانی است.

به‌منظور بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارافتادگی، آزمایش شیار جای چرخ به وسیله دستگاه ویل تراک^{۱۳} مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت انجام شد. برای این آزمایش، ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد، سپس نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه قرار گرفته و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۶۹۰ کیلوپاسکال، مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای انجام آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در مجموع، نمونه‌ها تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و بیشترین عمق شیار به‌وجودآمده در هر نمونه اندازه‌گیری شد. میانگین عمق شیار سه نمونه به‌عنوان عمق شیار هر نوع مخلوط در نظر گرفته شد.

۶- نتایج آزمایش‌ها

۶-۱- نتایج آزمایش مارشال و تعیین میزان قیر بهینه

نتایج آزمایش مارشال نشان داد، بیشترین مقاومت برای دانه‌بندی شماره ۴ مربوط به نمونه‌های با ۷۵٪ فیلر RHA و برای دانه‌بندی شماره ۵ مربوط به نمونه‌های با ۵۰٪ فیلر RHA می‌باشد. روانی نمونه‌ها نیز تقریباً در تمامی موارد به جزء نمونه با ۱۰۰٪ فیلر RHA و با درصد قیرهای ۶ و ۶/۵ درصد برای دانه‌بندی شماره ۴، الزامات آئین‌نامه را برآورده کرده است. درخصوص درصد فضای خالی آسفالت، نمونه‌های با ۶ و ۶/۵ درصد قیر و با داشتن میزان ۰٪ و ۲۵٪ فیلر RHA کمتر از حداقل مشخص شده در آئین‌نامه بودند. در برخی نمونه‌ها نیز درصد فضای خالی آسفالت از حداکثر فضای خالی مجاز مشخص شده در آیین‌نامه نیز بیشتر بوده

است. جدول‌های (۷) و (۸) به ترتیب نتایج حاصل از آزمایش‌های مارشال برای دو دانه‌بندی ۴ و ۵ را نشان می‌دهد. به‌طور کلی همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقاومت مارشال نمونه‌ها با افزایش درصد RHA در درصد قیر ثابت، افزایش یافته است. همچنین درصد فضای خالی و روانی نمونه‌ها با افزایش درصد RHA افزایش می‌یابند. وزن مخصوص نمونه‌ها نیز با افزایش RHA کاهش پیدا کرده‌است. دلیل افزایش همزمان مقاومت مارشال و درصد فضای خالی این است که افزایش مقدار RHA به میزان زیادی چسبندگی بین مصالح را افزایش داده تا حدی که تأثیر افزایش فضای خالی نمونه‌ها که خود به‌طور معمول باعث کاهش استحکام نمونه‌ها است از اثر چسبندگی ایجاد شده کمتر بوده و نمونه‌ها با افزایش RHA مقاوم‌تر می‌شوند. پس از بررسی نتایج آزمایش مارشال، درصد‌های قیر مربوط به بهترین نتایج وزن مخصوص، مقاومت مارشال و درصد آسفالت به‌دست آمد و سپس میانگین آنها در نمودارهای VMA، VFA و Flow قرار داده شد تا از در محدوده بودن نتایج حاصل شده در آئین‌نامه اطمینان حاصل شود. درصد قیر به‌دست‌آمده به‌عنوان درصد قیر بهینه مربوط به همان نوع نمونه که دارای میزان RHA مشخص شده‌ای است (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) تعیین شد. جدول (۹) نتایج قیر بهینه به‌دست‌آمده برای دو دانه‌بندی شماره ۴ و ۵ را نشان می‌دهد. به‌دلیل جذب قیر بیشتر RHA نسبت به پودر سنگ، میزان قیر بهینه مخلوط‌هایی که RHA بیشتری دارند، بالاتر است. در جدول (۹) هم مشاهده می‌شود که با افزایش RHA، میزان قیر بهینه نیز افزایش یافته است. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در دو دانه‌بندی شماره ۴ و ۵ مشخص شد که قیر بهینه دانه‌بندی شماره ۵ نسبت به دانه‌بندی شماره ۴، بیشتر است. دلیل این افزایش، مصالح به مراتب ریزتر دانه‌بندی شماره ۵ و به تبع آن جذب قیر بیشتر این مصالح می‌باشد. با درصد قیرهای بهینه‌ی به‌دست‌آمده از جدول (۹) نمونه‌های جدیدی با دانه‌بندی قبلی برای هر درصد RHA ساخته شد و آزمایش‌های مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی برای آنها انجام گردید.

جدول ۷. نتایج حاصل از آزمایش مارشال و پارامترهای آن برای نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی شماره ۴

G_{mb} (gr/cm^3)	V_a (%)	G_{sb} (gr/cm^3)	VMA (%)	G_{mm} (gr/cm^3)	VFA (%)	Satability (kg)	Flow (mm)	نام نمونه
۲/۲۶۵	۴/۵۹	۲/۵۸۳	۱۵/۸۲	۲/۳۷۴	۷۰/۹۹	۱۱۵۹	۲/۱۰	R0-4
۲/۲۵۹	۴/۶۸	۲/۵۵۷	۱۵/۱۹	۲/۳۷۰	۶۹/۱۹	۱۲۲۶	۲/۲۰	R25-4
۲/۲۵۱	۴/۹۰	۲/۵۴۴	۱۵/۰۶	۲/۳۶۷	۶۷/۴۶	۱۲۸۱	۲/۲۵	R50-4
۲/۲۳۰	۵/۳۹	۲/۵۳۱	۱۵/۴۲	۲/۳۵۷	۶۵/۰۵	۱۲۸۳	۲/۴۰	R75-4
۲/۱۹۸	۶/۴۳	۲/۵۱۸	۱۶/۲۰	۲/۳۴۹	۶۰/۳۱	۱۲۱۱	۲/۶۵	R100-4
۲/۳۲۴	۳/۸۹	۲/۵۸۳	۱۴/۰۸	۲/۴۱۸	۷۲/۳۷	۱۱۶۵	۲/۴۰	R0-4.5
۲/۳۱۵	۳/۹۰	۲/۵۵۷	۱۳/۵۴	۲/۴۰۹	۷۱/۲۰	۱۲۹۶	۲/۴۵	R25-4.5
۲/۳۰۸	۴/۱۱	۲/۵۴۴	۱۳/۳۶	۲/۴۰۷	۶۹/۲۴	۱۳۲۸	۲/۶۰	R50-4.5
۲/۲۸۴	۴/۶۷	۲/۵۳۱	۱۳/۸۲	۲/۳۹۶	۶۶/۲۱	۱۳۳۲	۲/۹۰	R75-4.5
۲/۲۵۸	۵/۶۸	۲/۵۱۸	۱۴/۳۶	۲/۳۹۴	۶۰/۴۵	۱۲۷۴	۳/۰۰	R100-
۲/۳۶۷	۳/۳۱	۲/۵۸۳	۱۲/۹۴	۲/۴۴۸	۷۴/۴۲	۱۱۳۰	۲/۵۵	R0-5
۲/۳۵۶	۳/۳۶	۲/۵۵۷	۱۲/۴۷	۲/۴۳۸	۷۳/۰۵	۱۲۶۴	۲/۷۵	R25-5
۲/۳۵۳	۳/۵۳	۲/۵۴۴	۱۲/۱۳	۲/۴۳۹	۷۰/۹۰	۱۳۵۳	۲/۸۰	R50-5
۲/۳۲۹	۴/۱۶	۲/۵۳۱	۱۲/۵۸	۲/۴۳۰	۶۶/۹۳	۱۳۸۱	۳/۰۵	R75-5
۲/۲۹۷	۵/۱۲	۲/۵۱۸	۱۳/۳۴	۲/۴۲۱	۶۱/۶۲	۱۳۲۹	۳/۳۵	R100-5
۲/۳۸۹	۳/۰۰	۲/۵۸۳	۱۲/۶۰	۲/۴۶۳	۷۶/۱۹	۱۰۹۶	۲/۷۰	R0-5.5
۲/۳۸۱	۳/۰۹	۲/۵۵۷	۱۲/۰۰	۲/۴۵۷	۷۴/۲۵	۱۱۶۰	۲/۸۰	R25-5.5
۲/۳۷۲	۳/۲۶	۲/۵۴۴	۱۱/۸۹	۲/۴۵۲	۷۲/۵۸	۱۲۷۶	۳/۰۰	R50-5.5
۲/۳۵۴	۳/۸۸	۲/۵۳۱	۱۲/۱۱	۲/۴۴۹	۶۷/۹۶	۱۳۶۸	۳/۲۰	R75-5.5
۲/۳۱۸	۴/۸۰	۲/۵۱۸	۱۳/۰۰	۲/۴۳۵	۶۳/۰۸	۱۳۵۳	۳/۵۰	R100-
۲/۳۸۲	۲/۸۶	۲/۵۸۳	۱۳/۳۱	۲/۴۵۲	۷۸/۵۱	۹۸۴	۲/۸۵	R0-6
۲/۳۸۷	۲/۹۸	۲/۵۵۷	۱۲/۵۸	۲/۴۵۱	۷۶/۳۱	۱۰۷۹	۲/۹۰	R25-6
۲/۳۶۷	۳/۱۹	۲/۵۴۴	۱۲/۵۴	۲/۴۴۵	۷۴/۵۶	۱۰۹۲	۳/۱۰	R50-6
۲/۳۴۸	۳/۷۳	۲/۵۳۱	۱۲/۸۰	۲/۴۳۹	۷۰/۸۶	۱۱۹۴	۳/۳۵	R75-6
۲/۳۱۱	۴/۷۴	۲/۵۱۸	۱۳/۷۳	۲/۴۲۶	۶۵/۴۸	۱۱۶۵	۳/۶۰	R100-6
۲/۳۷۱	۲/۸۳	۲/۵۸۳	۱۴/۱۷	۲/۴۴۰	۸۰/۰۳	۹۰۲	۲/۹۰	R0-6.5
۲/۳۶۴	۲/۹۲	۲/۵۵۷	۱۳/۵۶	۲/۴۳۵	۷۸/۴۷	۹۷۱	۲/۹۵	R25-6.5
۲/۳۵۶	۳/۱۳	۲/۵۴۴	۱۳/۴۱	۲/۴۳۲	۷۶/۶۶	۱۰۴۶	۲/۹۵	R50-6.5
۲/۳۳۷	۳/۷۱	۲/۵۳۱	۱۳/۶۷	۲/۴۲۷	۷۲/۸۶	۱۱۰۶	۳/۲۵	R75-6.5
۲/۳۰۱	۴/۶۸	۲/۵۱۸	۱۴/۵۶	۲/۴۱۴	۶۷/۸۶	۱۰۵۸	۳/۸۰	R100-

جدول ۸ نتایج حاصل از آزمایش مارشال و پارامترهای آن برای نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی شماره ۵

G _{mb} (gr/cm ³)	V _a (%)	G _{sb} (gr/cm ³)	VMA (%)	G _{mm} (gr/cm ³)	VFA (%)	Satubility (kg)	Flow (mm)	نام نمونه
۲/۲۳۶	۵/۴۵	۲/۵۷۳	۱۶/۵۷	۲/۳۶۵	۶۷/۱۱	۱۱۲۹	۲/۱۵	R0-4
۲/۲۳۱	۵/۵۹	۲/۵۵۹	۱۶/۳۰	۲/۳۶۳	۶۵/۷۰	۱۲۰۵	۲/۳۰	R25-4
۲/۲۱۹	۵/۸۱	۲/۵۴۶	۱۶/۳۲	۲/۳۵۶	۶۴/۴۰	۱۲۲۱	۲/۴۰	R50-4
۲/۱۹۸	۶/۲۷	۲/۵۳۳	۱۶/۷۰	۲/۳۴۵	۶۲/۴۶	۱۱۷۵	۲/۵۵	R75-4
۲/۱۶۵	۷/۰۰	۲/۵۱۵	۱۷/۳۶	۲/۳۲۸	۵۹/۶۸	۹۹۱	۲/۷۵	R100-4
۲/۲۹۶	۴/۳۳	۲/۵۷۳	۱۴/۷۸	۲/۴۰۰	۷۰/۷۰	۱۱۳۹	۲/۳۵	R0-4.5
۲/۲۹۱	۴/۴۲	۲/۵۵۹	۱۴/۵۰	۲/۳۹۷	۶۹/۵۲	۱۲۱۷	۲/۶۰	R25-4.5
۲/۲۷۵	۴/۶۱	۲/۵۴۶	۱۴/۶۶	۲/۳۸۵	۶۸/۵۵	۱۲۷۳	۲/۶۵	R50-4.5
۲/۲۳۴	۵/۰۲	۲/۵۳۳	۱۵/۷۷	۲/۳۵۲	۶۸/۱۷	۱۲۴۲	۲/۸۰	R75-4.5
۲/۲۱۶	۵/۵۸	۲/۵۱۵	۱۵/۸۵	۲/۳۴۷	۶۴/۷۹	۱۰۱۸	۳/۰۰	R100-4.5
۲/۳۲۵	۳/۵۳	۲/۵۷۳	۱۴/۱۶	۲/۴۱۰	۷۵/۰۷	۱۰۹۸	۲/۴۵	R0-5
۲/۳۲۴	۳/۶۱	۲/۵۵۹	۱۳/۷۲	۲/۴۱۱	۷۳/۶۹	۱۱۷۴	۲/۷۰	R25-5
۲/۳۱۰	۳/۷۵	۲/۵۴۶	۱۳/۸۱	۲/۴۰۰	۷۲/۸۴	۱۲۸۶	۲/۷۵	R50-5
۲/۲۹۶	۴/۰۱	۲/۵۳۳	۱۳/۸۹	۲/۳۹۲	۷۱/۱۳	۱۲۸۳	۳/۰۰	R75-5
۲/۲۵۹	۴/۴۸	۲/۵۱۵	۱۴/۶۷	۲/۳۶۵	۶۹/۴۶	۱۰۸۵	۳/۱۰	R100-5
۲/۳۶۷	۳/۱۵	۲/۵۷۳	۱۳/۰۶	۲/۴۴۴	۷۵/۸۸	۱۰۴۹	۲/۶۵	R0-5.5
۲/۳۶۳	۳/۲۴	۲/۵۵۹	۱۲/۷۴	۲/۴۴۲	۷۴/۵۷	۱۱۶۵	۲/۹۰	R25-5.5
۲/۳۴۸	۳/۴۱	۲/۵۴۶	۱۲/۸۵	۲/۴۳۱	۷۳/۴۶	۱۱۹۹	۲/۹۵	R50-5.5
۲/۳۲۱	۳/۶۵	۲/۵۳۳	۱۳/۴۱	۲/۴۰۹	۷۲/۷۸	۱۱۸۷	۳/۰۵	R75-5.5
۲/۲۷۸	۴/۰۸	۲/۵۱۵	۱۴/۴۱	۲/۳۷۵	۷۱/۶۸	۱۱۲۳	۳/۳۵	R100-5.5
۲/۳۸۱	۲/۹۷	۲/۵۷۳	۱۳/۰۱	۲/۴۵۴	۷۷/۱۷	۹۹۵	۲/۸۰	R0-6
۲/۳۷۴	۳/۰۶	۲/۵۵۹	۱۲/۷۹	۲/۴۴۹	۷۶/۰۷	۱۱۴۶	۲/۹۵	R25-6
۲/۳۵۹	۳/۲۴	۲/۵۴۶	۱۲/۹۰	۲/۴۳۸	۷۴/۸۸	۱۱۴۲	۳/۰۵	R50-6
۲/۳۳۷	۳/۴۷	۲/۵۳۳	۱۳/۲۷	۲/۴۲۱	۷۳/۸۵	۱۱۰۹	۳/۲۵	R75-6
۲/۲۹۸	۴/۸۹	۲/۵۱۵	۱۴/۱۱	۲/۳۹۱	۷۲/۴۳	۱۰۷۴	۳/۴۰	R100-6
۲/۳۷۷	۲/۸۶	۲/۵۷۳	۱۳/۶۲	۲/۴۴۷	۷۹/۰۰	۸۷۷	۲/۹۰	R0-6.5
۲/۳۷۰	۲/۹۹	۲/۵۵۹	۱۳/۴۰	۲/۴۴۳	۷۷/۶۹	۱۰۱۲	۳/۰۵	R25-6.5
۲/۳۵۳	۳/۱۷	۲/۵۴۶	۱۳/۵۹	۲/۴۳۰	۷۶/۶۷	۱۰۳۷	۳/۱۵	R50-6.5
۲/۳۳۴	۳/۴۳	۲/۵۳۳	۱۳/۸۴	۲/۴۱۷	۷۵/۲۲	۹۹۲	۳/۳۵	R75-6.5
۲/۲۹۱	۳/۸۲	۲/۵۱۵	۱۴/۸۳	۲/۳۸۲	۷۴/۲۴	۹۳۴	۳/۴۵	R100-6.5

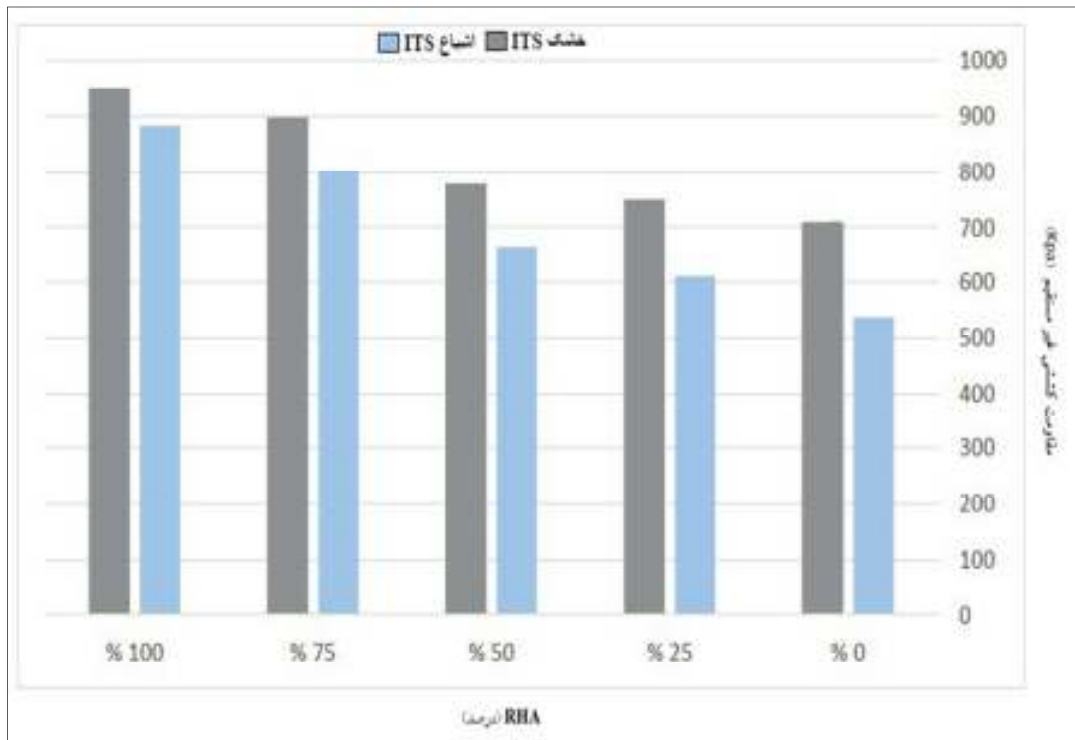
جدول ۹. میزان قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی

شماره دانه‌بندی	میزان قیر بهینه (درصد)	میزان RHA (درصد)	نام نمونه آسفالتی
۴	۵/۰۳	۰	R0
۴	۵/۱۱	۲۵	R25
۴	۵/۲۲	۵۰	R50
۴	۵/۲۸	۷۵	R75
۴	۵/۳۷	۱۰۰	R100
۵	۵/۲۵	۰	R0
۵	۵/۳۲	۲۵	R25
۵	۵/۴۳	۵۰	R50
۵	۵/۵۱	۷۵	R75
۵	۵/۶۲	۱۰۰	R100

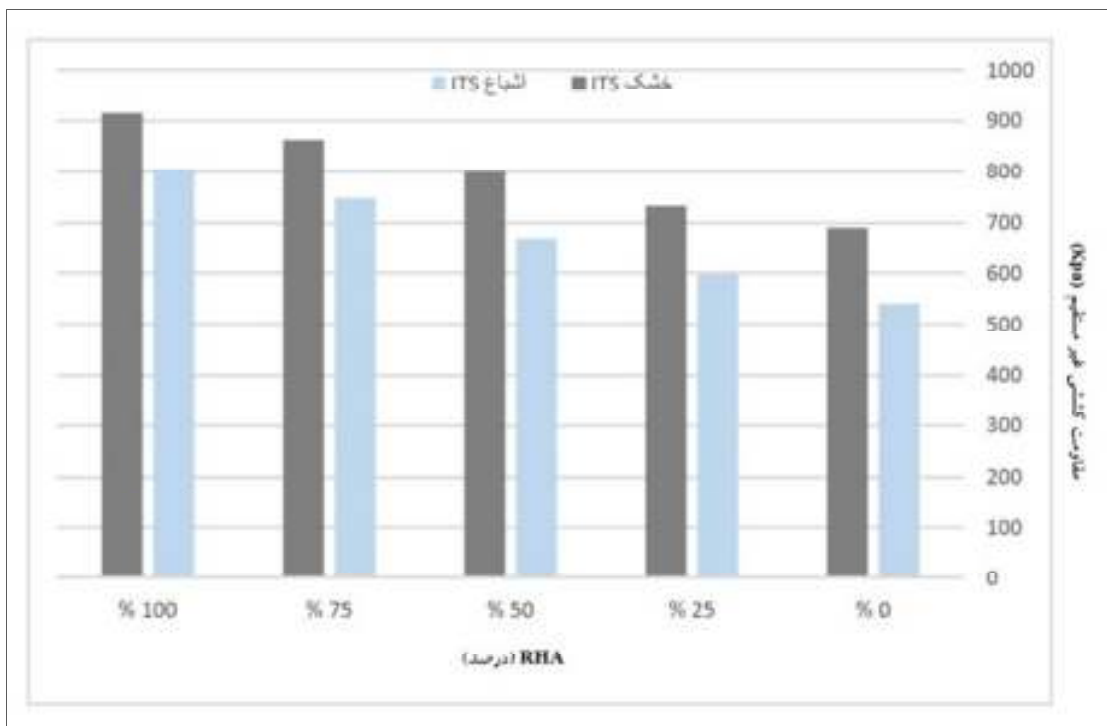
۶-۲- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از نسبت TSR نمونه‌ها مشخص می‌شود که با افزایش درصد RHA، TSR نیز روند افزایشی داشته و نسبت به نمونه کنترل مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد که این نشان‌دهنده تأثیر مثبت RHA در افزایش مقاومت در برابر آسیب حاصل از رطوبت می‌باشد. دلیل افزایش اثرات مثبت RHA را می‌توان با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش و تحقیقات گذشته در این دانست که RHA به‌عنوان یک پوزولان مصنوعی با داشتن بیش از نود درصد سیلیس فعال، واکنش شدیدی با قیر داشته، باعث بهبود خصوصیات رئولوژیکی قیر شده و علاوه بر آن پیوندهای هیدروژنی بین قیر و SiO_2 موجب افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌شود که در نتیجه این چسبندگی بیشتر، مخلوط حاصل نیز در مقابل رطوبت، مقاوم‌تر خواهد بود.

با توجه به نتایج آزمایش مارشال و پس از دستیابی به درصد قیر بهینه، نمونه‌هایی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم، بر اساس استاندارد AASHTO T283 تهیه شدند. از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک، نسبت TSR به‌دست می‌آید که شاخصی مؤثر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. طبق استاندارد نشریه ۲۳۴ نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش AASHTO T283 نسبت TSR نباید کمتر از ۸۰ درصد باشد. نتایج کامل آزمایش کشش غیرمستقیم در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارهای (۱) و (۲) مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر RHA مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی هم در شرایط خشک و هم در شرایط تر نسبت به مخلوط کنترل افزایش می‌یابد و علاوه بر این با



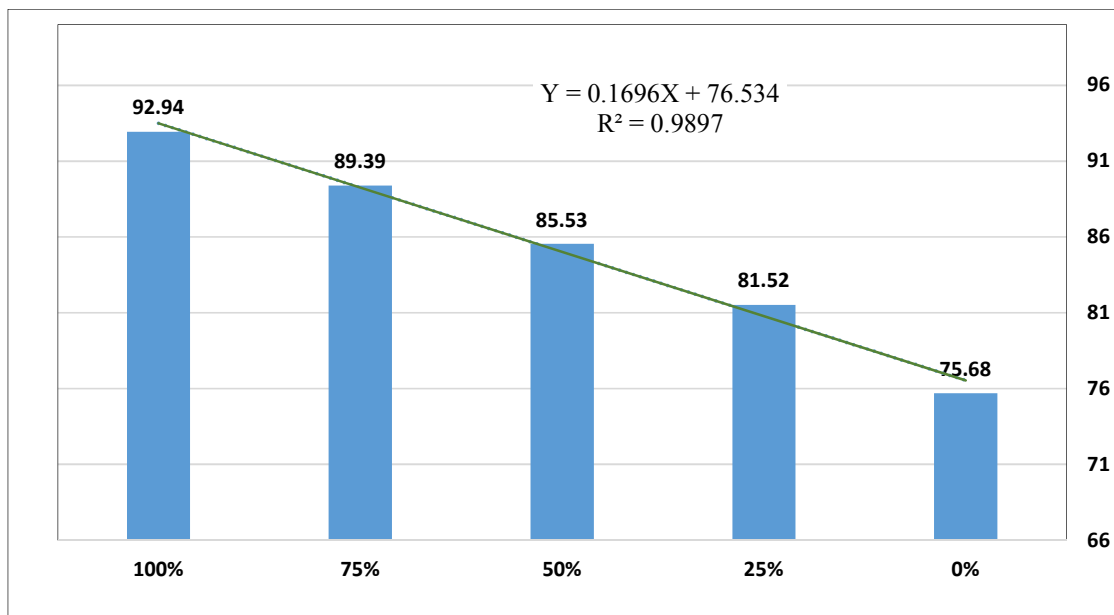
شکل ۱. مقایسه نتایج آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و اشباع در دانه بندی شماره ۴



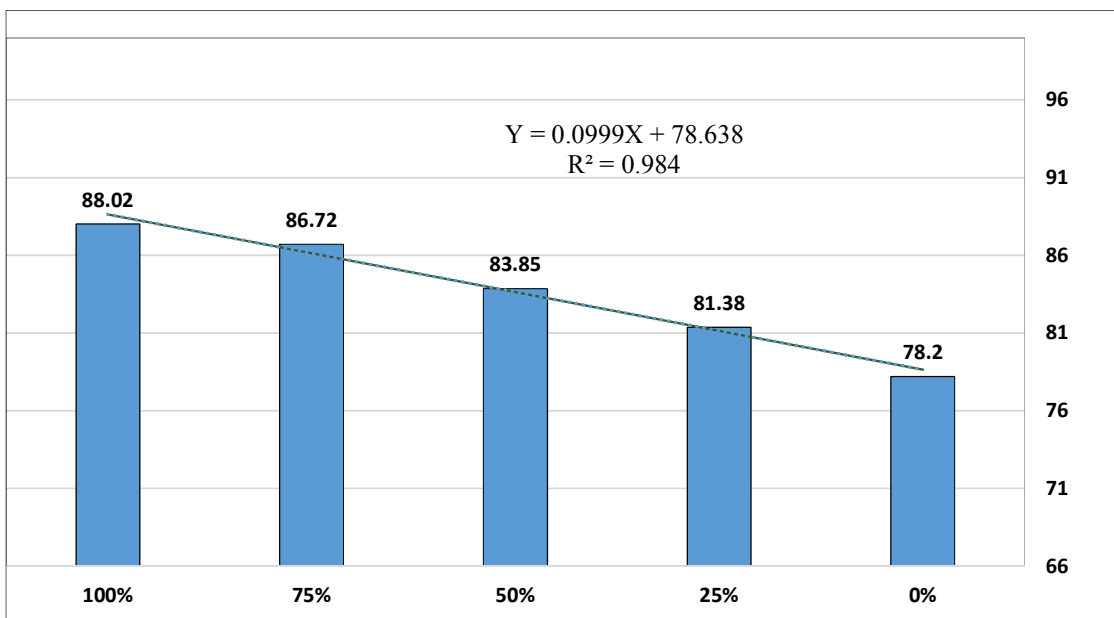
شکل ۲. مقایسه نتایج آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و اشباع در دانه بندی شماره ۵

شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهد که در نمونه‌های ساخته‌شده با دانه‌بندی شماره ۴ با افزایش RHA با درصد‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، TSR نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۱۳/۰، ۱۸/۱، ۲۲/۸ درصد افزایش داشته است و همین‌طور در دانه‌بندی شماره ۵، نمونه‌ها به نسبت نمونه کنترل به ترتیب ۴/۱، ۷/۲، ۱۰/۹ و ۱۲/۶ درصد افزایش داشته است.

شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهد که در نمونه‌های ساخته‌شده با دانه‌بندی شماره ۴ با افزایش RHA با درصد‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، TSR نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۱۳/۰، ۱۸/۱، ۲۲/۸ درصد افزایش داشته است و همین‌طور در دانه‌بندی شماره ۵، نمونه‌ها به نسبت نمونه کنترل به ترتیب ۴/۱، ۷/۲، ۱۰/۹ و ۱۲/۶ درصد افزایش داشته است.



شکل ۳. نسبت TSR در نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی شماره ۴



شکل ۴. نسبت TSR در نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی شماره ۵

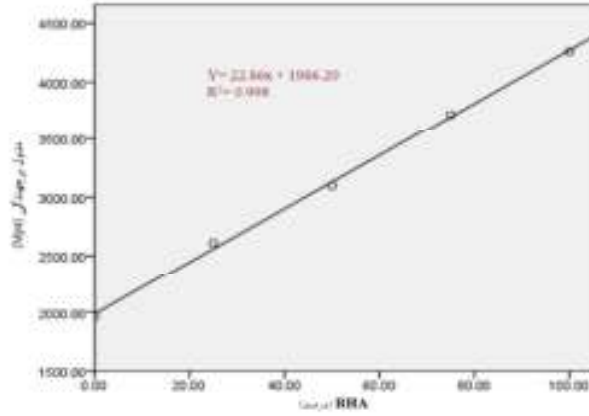
۳-۶- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی در جدول (۱۰) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی به میزان بسیار زیادی افزایش یافته و این مسئله باعث افزایش سختی مخلوط شده است. این افزایش نسبت به نمونه کنترل، برای دانه‌بندی شماره ۴ تا ۵۴٪ افزایش و برای دانه‌بندی شماره ۵ تا ۱۱۷٪ افزایش داشته است که میزان قابل توجهی می‌باشد. این میزان افزایش سختی نشان می‌دهد که RHA به میزان بسیار زیادی چسبندگی بین قیر و مصالح را بالا می‌برد که حتی با وجود اینکه با افزایش RHA درصد فضای خالی نمونه آسفالتی افزایش می‌یابد و به‌طور معمول با مدول برجهندگی رابطه عکس دارد، اما باز هم به میزان بسیار زیادی موجب سختی مخلوط آسفالتی شده است.

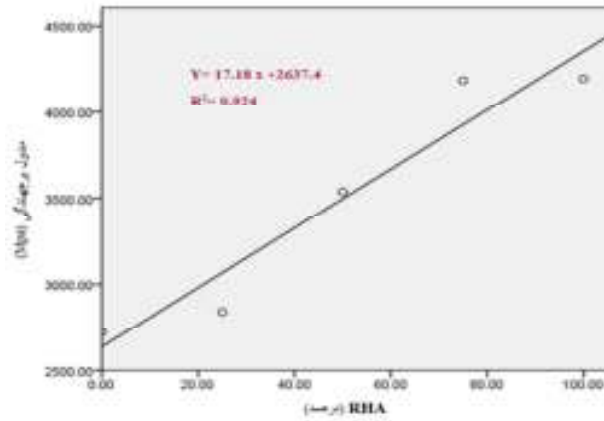
افزایش مدول برجهندگی ارتباط مستقیم با ضریب لایه آسفالتی در طرح ضخامت آسفالت دارد و هرچه مدول برجهندگی بیشتر باشد این ضریب بالاتر رفته و ضخامت لایه کاهش می‌یابد. اما افزایش بیش از حد این مدول سبب سخت‌شدن لایه آسفالتی شده و آن را شکننده می‌سازد که احتمال ترک‌خوردگی در اثر حرارت و خستگی افزایش خواهد یافت. لذا در آیین‌نامه ضریب ارتجاعی قشر بتن آسفالتی شامل آستر و رویه با آزمایش ASTM D-4123، حداکثر ۳۱۵۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع یا ۳۰۸۹/۱۴ مگاپاسکال تعیین شده است. در شکل‌های (۵) و (۶) اگر در رابطه به‌دست‌آمده ۳۰۸۹/۱۴ مگاپاسکال وارد شود، حداکثر درصد RHA که موجب می‌شود مدول الاستیسیته از حدود آیین‌نامه تجاوز نکند، به دست می‌آید. این درصد RHA برای دانه‌بندی شماره ۴، برابر با ۲۶ درصد و برای دانه‌بندی شماره ۵، برابر با ۴۸ درصد است.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با دانه‌بندی‌های ۴ و ۵ و درصدهای مختلف افزودنی

شماره نمونه آسفالتی	شماره دانه‌بندی	میزان RHA (درصد)	مدول برجهندگی (Mpa)
R0	۴	۰	۲۷۲۱
R25	۴	۲۵	۲۸۴۲
R50	۴	۵۰	۳۵۳۷
R75	۴	۷۵	۴۱۸۶
R100	۴	۱۰۰	۴۱۹۷
R0	۵	۰	۱۹۵۹
R25	۵	۲۵	۲۶۰۹
R50	۵	۵۰	۳۰۹۶
R75	۵	۷۵	۳۷۲۱
R100	۵	۱۰۰	۴۲۶۰



شکل ۵.



شکل ۶. نتایج آزمون مدول برجهندگی برای دانه بندی شماره ۴

جدول ۱۱. نتایج آزمایش اثر شیار جای چرخ بر روی نمونه های آسفالتی

شماره نمونه آسفالتی	شماره دانه بندی	میزان RHA (درصد)	میانگین عمق شیار (mm)
R0	۴	۰	۶/۶۷
R25	۴	۲۵	۴/۶۵
R50	۴	۵۰	۱/۶۸
R75	۴	۷۵	۰/۹۲
R100	۴	۱۰۰	۰/۶۸
R0	۵	۰	۸/۱۲
R25	۵	۲۵	۴/۸۵
R50	۵	۵۰	۲/۷۰
R75	۵	۷۵	۲/۱۳
R100	۵	۱۰۰	۰/۸۲

۷- جمع‌بندی نتایج و تعیین میزان بهینه RHA

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، تمامی نتایج حاصل به جزء آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهند که تقریباً در اکثر درصد‌های استفاده شده از RHA نتایج در محدوده آیین‌نامه قرار دارند. با بررسی نتایج مشخص شد که در آزمایش مدول برجهندگی استفاده از RHA بیشتر، منجر به سختی بیش از حد نمونه می‌شود. لذا حداکثر RHA قابل استفاده در مخلوط که سختی نمونه‌ی آسفالتی را از حد مشخص شده در آیین‌نامه بالاتر نبرد، برای دانه‌بندی‌های شماره ۴ و ۵ ارائه شد. نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی و شیارشدگی نیز نشان دادند که استفاده از RHA بیشتر به‌عنوان جایگزین فیلر پودر سنگ می‌تواند عملکرد نمونه‌های آسفالتی را بهبود بخشد و محدودیتی برای استفاده از RHA وجود ندارند. از نتایج آزمایش مارشال نیز مشخص شد که تمامی نمونه‌های ساخته شده در تمامی درصد‌های RHA بالاتر از حداقل مقاومت لازم در آیین‌نامه بودند. از مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که میزان RHA که بتواند جایگزین فیلر پودر سنگ به‌عنوان فیلر شود و تمامی موارد آیین‌نامه نیز رعایت شود همان میزان درصد‌های RHA بهینه به‌دست‌آمده در آزمایش مدول برجهندگی هستند. به‌عنوان یک نتیجه در این پژوهش می‌توان گفت برای دانه‌بندی شماره ۴ میزان RHA بهینه جایگزین فیلر پودر سنگ برابر ۲۶ درصد و برای دانه‌بندی شماره ۵، مقدار ۴۸/۵ درصد است.

۱. با افزایش مقادیر RHA، مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی هم در شرایط خشک و هم در شرایط اشباع نسبت به مخلوط کنترل افزایش می‌یابد.

۲. نمونه‌های ساخته‌شده در دانه‌بندی شماره ۴ با افزایش RHA با درصد‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، مقدار TSR نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۰/۷، ۱۳/۰، ۱۸/۱، ۲۲/۸ درصد افزایش داشته است و همین‌طور در دانه‌بندی شماره ۵، TSR نمونه‌ها به نسبت نمونه کنترل به ترتیب ۴/۱، ۷/۲، ۱۰/۹، ۱۲/۶ درصد افزایش داشته است.

۳. با افزایش RHA در نمونه‌های آسفالتی، مدول برجهندگی نمونه‌ها به میزان بسیار زیادی افزایش یافته است. این افزایش نسبت به نمونه کنترل، برای دانه‌بندی شماره ۴ تا ۵۴ درصد و برای دانه‌بندی شماره ۵ تا ۱۱۷ درصد افزایش داشته است.

۴. از نتایج مشخص شد که نمونه‌های ساخته‌شده با RHA مقاومت بالایی در مقابل پدیده شیارشدگی دارند و با افزایش درصد RHA، عمق شیارها کاهش می‌یابد.

۵. درصد بهینه تعیین شده RHA در این پژوهش با در نظر گرفتن محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای، برای دانه‌بندی شماره ۴، ۲۶ درصد و برای دانه‌بندی شماره ۵، ۴۸/۵ درصد تعیین گردید.

۶. به‌عنوان یک نتیجه در این پژوهش می‌توان گفت در مناطقی که برنج در سطح وسیعی کشت می‌شود و RHA به‌عنوان یک ماده ضایعاتی وجود دارد، می‌توان از RHA به‌عنوان جایگزین بخشی از فیلر در مخلوط آسفالتی گرم استفاده نمود. به خصوص اینکه برنج محصول مناطق با بارش زیاد است و دقیقاً در همین مکان‌ها پتانسیل بالایی برای آسیب‌های رطوبتی آسفالت وجود دارد.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا نمونه‌هایی با ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد RHA که جایگزین فیلر پودر سنگ شده بود برای دانه‌بندی‌های شماره ۴ و ۵ و برای قیرهای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد ساخته شد. آزمایش مارشال انجام شد و پارامترهای مارشال نیز به‌دست آمد. سپس بر اساس نمودارهای وزن مخصوص، روانی، مقاومت مارشال، VMA، VFA و Va، قیر بهینه مختص به آن درصد از فیلر RHA استفاده شده برای هر سری از نمونه‌ها به‌دست آمد. در ادامه نمونه‌های جدیدی با قیر بهینه به‌دست آمده و دانه‌بندی‌هایی که در

۹-سیاسگزاری

پدیده واکنش قلیائی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

نویسندگان از زحمات و همکاری کارکنان و مسئولین آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک شهرستان‌های نور و نوشهر، پرسنل آزمایشگاه مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) و همچنین پرسنل آزمایشگاه دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شمال آمل که امکان انجام آزمایش‌های صورت گرفته را فراهم کرده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۱۰-پی‌نوشت‌ها

- 1-Filler
- 2-Waste Materials
- 3-Biofuels
- 4-Biomass
- 5-Rutting
- 6-Moisture Sensitivity
- 7-Resilient Modulus
- 8-Ordinary Portland Cement
- 9-Age of Aging
- 10-Rice Husk Ash
- 11-Stripping
- 12-Visco Elastic
- 13-Wheel Track

۱۱-مراجع

- رضانیانپور، ع. و مهدی‌خانی، م. و پوریبیک، پ. و کیومرثی، م. م. و زمانی، م. (۱۳۸۸) "ارزیابی دوام و خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی خاکستر پوسته برنج"، اولین کنفرانس ملی بتن، گروه بین‌المللی راهبران.
- زارعی، س. و شاه‌بابایی، م. و سلطانی، ا. و علاء، م. (۱۳۹۴) "بررسی آزمایشگاهی تأثیر فیلرهای معدنی بر خصوصیات فیزیکی قیر"، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز، اردیبهشت ۱۳۹۴.
- زارعی، پ. و ملکی، م. و الیاسی، م. (۱۳۹۴) "بررسی خصوصیات آسفالتی گرم در نوع فیلر استفاده شده"، اولین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران.
- عامری، م. و وامق، م. و روح‌الامینی، ح. و بمانا، ک. (۱۳۹۳) "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۴.
- غفارپور جهرمی، س. و خدایی، ع. (۱۳۸۸) "تأثیر خصوصیات فیزیکی-هندسی فیلرهای نوین و سنتی بر مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸، صفحه ۵۲-۴۱.
- کاووسی، ا. و بختیاری، ج. (۱۳۹۲) "بررسی تأثیرات دما و فیلر آهک هیدراته در مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۲.
- گلشنی، ه. و قلعه‌نوی، م. و صحاف، س.ع. (۲۰۱۵)، "بررسی تأثیر کاربرد پودر میکروسلیس در بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی داغ"، هفتمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران.
- اکرزاده، م. (۱۳۹۴) "بررسی تأثیر خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری ملات‌های ساخته شده با سیمان‌های پرتلند کارخانجات شرق کشور"، کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین در عمران، معماری، محیط زیست و مدیریت شهری.
- بهبهانی، ح. و ایازی، م.ج. و شجاعی، م.ح. (۱۳۹۴) "ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال هفتم، شماره ۳، بهار ۱۳۹۵.
- رضانیانپور، ع. و ضرابی گل‌خطمی، ک. و مهدی‌خانی، م. و احمدی‌بنی، غ. (۱۳۸۷) "تولید بهینه خاکستر پوسته برنج و بررسی اثر بتن‌های ساخته شده با این خاکستر در پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۳، زمستان ۱۳۹۶

- De Assis, S. R. H., de Queiroz, B. O., Araújo, C. C., Nunes, K. K. F., de Melo, R. A., and Lucena, L. C. D. F. L. (2017), "Evaluation of limestone crushed dust aggregates in hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 148, pp. 659-665.
- Goh, B. H., Sunnasee, P., Chin, K. H., Kang, B. G., and Kok, S. T. (2014) "Utilisation of Rice Husk Ash in Asphaltic Concrete Pavement", In *Advanced Materials Research*, Vol. 1030, pp. 961-964, Trans Tech Publications.
- Gupta, K., Kumar, M., and Chopra, T. (2013), "Laboratory Investigation Of Dense Bituminus Macadam (GRADE 1) Mix Using Different Types Of Additives", Thapar University, Patiala 147004.
- Jordan, C. A., and Akay, G. (2012), "Speciation and distribution of alkali, alkali earth metals and major ash forming elements during gasification of fuel cane bagasse", *Fuel*, Vol. 91, no. 1, pp. 253-263.
- Karaşahin, M., and Terzi, S. (2007), "Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 21, no. 3, pp. 616-620.
- Khan, R., Jabbar, A., Ahmad, I., Khan, W., Khan, A. N., and Mirza, J. (2012), "Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Construction and Building Materials*", 30, pp. 360-365.
- Li, C., Chen, Z., Wu, S., Li, B., Xie, J., and Xiao, Y. (2017), "Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic". *Construction and Building Materials*, 145, pp. 383-391.
- Muniandy, R., Aburkaba, E., and Mahdi, L. M. (2013), "Effect of Mineral Filler Type and Particle Size On Asphalt-Filler Matrix And Stone Matrix Asphalt Laboratory Measured Properties". *Australian Journal*
- مدرس، ا. و رحمانزاده، م. (۱۳۹۵)، "مقایسه تأثیر فیلر پسماند زغالسنگ با فیلرهای پوزولانی بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالت گرم"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۳، شماره پیاپی ۴۸، پاییز ۱۳۹۵، ص. ۸۶-۱۰۳.
- یوسف‌دوست، س. و فرزانه، ا. و اسماعیلی، ع.م. و احمدی، ا. (۱۳۹۰)، "بررسی آزمایشگاهی مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و فشاری تک‌محوری مخلوط‌های آسفالت بازیافت‌شده با استفاده از کف‌گیر"، نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دوره ۴۵، شماره ۷، صفحه ۸۰۳-۸۲۵.
- Al-Hdabi, A. (2016), "Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler". *Construction and Building Materials*, 126, pp. 544-551.
- Abdulfatai Adinoyi, M., and Lawal, S. (2014), "Partial replacement of cement with rice husk ash (RHA) as filler in asphalt concrete design". *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, pp. 30 – 40.
- Akter, R., and Hossain, M. K. (2017), "Influence of Rice Husk Ash and Slag as Fillers in Asphalt Concrete Mixes", *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol. 6, no. 1, pp. 303-311.
- Bhattacharya, S. C., Salam, P. A., Pham, H. L., and Ravindranath, N. H. (2003), "Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries". *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, no. 5, pp. 471-482.
- Borhan, M. N., Ismail, A., and Rahmat, R. A. (2010), "Evaluation of palm oil fuel ash (POFA) on asphalt mixtures", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 4, no. 10, pp. 5456-5463.
- Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P., and Liu, C. H. (2011), "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, no. 4, pp. 1532-1536.

- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., and Vassileva, C. G. (2010), "An overview of the chemical composition of biomass", *Fuel*, Vol. 89, no. 5, pp. 913-933.
- West, R. C., and James, R. S. (2005), "Evaluation of a Lime Kiln Dust as a Mineral Filler For Stone Matrix Asphalt", *Transportation Research Board*, Washington.
- Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., and Zha, J. (2009), "Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: pavement performance and environmental impact", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, no. 2, pp. 989-996.
- Yilmaz, M., K k, B. V., and Kulođlu, N. (2011), "Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, no. 11, pp. 4279-4286.
- of Basic and Applied Sciences, Vol. 7, no. 11, pp. 475-487.
- Park, D. W., Seo, W. J., Kim, J., & Vo, H. V. (2017), "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixture using liquid anti-stripping agents", *Construction and Building Materials*, 144, pp. 399-405.
- Ramezani-pour, A. A. (2014), "Cement Replacement Materials", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sangiorgi, C., Tataranni, P., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., and Lantieri, C. (2017), "Alternative Fillers for the Production of Bituminous Mixtures: A Screening Investigation on Waste Powders", *Coatings*, Vol. 7, no. 6, pp.76.
- Sargın, Ő., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., and Terzi, S. (2013), "Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, 48, pp. 390-397.