

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی

حاوی مواد پوزولان مصنوعی

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چویدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ameli@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

صفحه ۳۷۹-۳۹۳

چکیده

در این مقاله، استفاده از خاکستر پوسته برنج (RHA^1) در مخلوط آسفالت گرم (HMA^2) به عنوان فیلر مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی جایگزینی فیلر معدنی، افزایش عملکرد مخلوط آسفالتی و تولید یک مخلوط آسفالتی اقتصادی است. برای این منظور، پنج مخلوط مختلف تهیه شد. اولی یک مخلوط کنترل (مخلوط سنتی) حاوی ۱۰۰٪ پودر سنگ آهک (LSD^3) به عنوان فیلر و ۰٪ RHA بود. در حالی که سایر مخلوط ها حاوی ۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد و ۱۰۰ درصد RHA به عنوان درصدی از وزن فیلر هستند. محتوای بهینه قیر (OBC^4) با استفاده از آزمون مارشال تعیین شد. همچنین تمام پارامترهای مارشال (پایداری، درصد هوا، فضاهای خالی در سنگدانه‌های معدنی، وزن واحد و عدد روانی) مورد بررسی قرار گرفت. تست مقاومت کششی غیرمستقیم ($ITST^5$) و تست شیارهای چرخ (WTT^6) انجام شد و نتایج آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدول دینامیکی (E^*) یک پارامتر مهم مورد استفاده در طراحی مکانیکی-تجربی روسازی در نظر گرفته می‌شود. E^* در ترکیبات مختلف دما/فرکانس اندازه‌گیری می‌شود. مدول دینامیکی (E^*) و زاویه فاز (δ) برای توصیف خصوصیات ویسکوالاستیک HMA استفاده می‌شود. بنابراین، این خواص برای مخلوط با و بدون RHA اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که RHA پتانسیل استفاده به عنوان جایگزین جزئی فیلر معدنی LSD در ساخت و ساز روسازی را دارد. افزودن RHA سفتی مارشال را افزایش می‌دهد، عمق شیار را کاهش می‌دهد و مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، یک تغییر قابل توجه در OBC برای همه مخلوط‌ها رخ داده است و نسبت جایگزینی بهینه به عنوان $LSD/RHA: 50\%$ ثبت شده است. در نهایت، مخلوط‌های حاوی RHA مقادیر مدول دینامیکی و عدد روانی بالاتری را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: خاکستر پوسته برنج، مخلوط آسفالت گرم، مدول دینامیک (E^*)، آزمایش مارشال، عمق شیار، استحکام کششی غیر مستقیم

۱-مقدمه

بر این، تلاش‌های تعمیر و نگهداری بیش از حد انجام شده و جریان ترافیک در طول دوره تعمیر و نگهداری نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. بنابراین، افزایش عملکرد مخلوط آسفالت ضروری است. روش‌های مختلفی برای افزایش خواص HMA

به علت افزایش مداوم در حجم ترافیک و درصد کامیون‌های با بارهای سنگین و همچنین فشار تایر، بسیاری از محققان افزایش در خرابی روسازی مانند شیار، سایش سطح و ترک حتی برای جاده‌های تازه ساخته شده را گزارش کردند. علاوه

بادی، خاکستر پوسته برنج) استفاده شد. همچنین، از سه نوع مخلوط بدون افزودنی برای بررسی اثرات سنگدانه‌ها و افزودنی‌های مختلف بر روی خواص مکانیکی مخلوط‌های سرد در محل بازیافت شده استفاده شد.

بررسی اثر استفاده از RHA به عنوان یک اصلاح کننده بایندر بر روی آسفالت مخلوط داغ مورد آزمایش قرار گرفت. قیر مخلوط با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد تأثیر استفاده از RHA را در افزایش خواص مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه از RHA، آهک هیدراته و خاکستر بادی به عنوان فیلر استفاده شد. نتایج نشان داد که RHA میل ترکیبی بیشتری را به قیر نشان می‌دهد که بیشترین اثر سفت کنندگی قطرات ماستیک قیر را نسبت به سایر فیلهای مورد استفاده نسبت می‌دهد. تحقیق دیگری با استفاده از آنها به عنوان اصلاح کننده چسب، اثر پودر لاستیک و RHA بر را بررسی کرد. RHA و CRP^V برای انجام مخلوط‌ها با هم ترکیب شده‌اند، درصدهای مختلفی از ۱٪ RHA، ۴٪ و ۷٪ و ۵٪ CRP، ۱۰٪ و ۱۵٪ برای تهیه آسفالت اصلاح شده با وزن چسب آسفالت استفاده شد. مخلوط‌های دیگر تنها با استفاده از یک اصلاح کننده، RHA یا CRP با همان نسبت‌های بالا تهیه شدند و سپس با مخلوط اول مقایسه شدند. بایندر آسفالت اصلاح شده (RHA + CRP) کارایی بهتری نسبت به قیر اصلاح شده RHA یا CRP نشان داد (Al Hdabi et al, 2016; Mistry et al, 2019). تحقیق دیگری عملکرد ماستیک‌ها و مخلوط SMA^A حاوی خاکستر زباله زغال سنگ CWA¹ و RHA را در نسبت‌های مختلف (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) به عنوان جایگزین LSD به عنوان فیلر معمولی ارزیابی کرد. آزمایش‌های مختلفی از جمله پایداری مارشال، تست شیارجای چرخ، تست مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول ارتجاعی و مقاومت در برابر رطوبت روی مخلوط انجام شد. نتایج نشان داد که خواص مخلوط‌های اصلاح شده در مقایسه با مخلوط کنترل افزایش یافته است (Abdelmagid et al, 2019; Ameli et al, 2020). چندین تحقیق با استفاده از RHA در افزایش خواص مهندسی HMA مورد مطالعه قرار گرفتند و بهبود قابل توجهی یافت شد (Aker et al, 2017; behnood et al, 2015). بنابراین، هدف از این مطالعه ارزیابی اثر RHA بر خواص مهندسی HMA است.

استفاده می‌شود و استفاده از افزودنی‌ها پیشنهاد شده‌اند. از سوی دیگر سوزاندن پوسته برنج یکی از مشکلات زیست محیطی در جهان است. اثرات منفی بر سلامت و زندگی انسان دارد. سوزاندن پوسته برنج عامل اصلی آنچه "ابر سیاه" نامیده می‌شود است که تأثیرات منفی بر محیط زیست و سلامت انسان دارد. بنابراین در این تحقیق از RHA در مخلوط‌های آسفالتی به عنوان جایگزین فیلر معدنی برای کاهش مصرف LSD و بهبود خواص مهندسی HMA استفاده شد. همچنین مقدار مشخصی RHA را در مخلوط‌های آسفالتی مصرف کنید و در نتیجه اثر ابر سیاه را کاهش دهید.

عوامل مختلفی بر شیار شدن و ترک خوردگی مخلوط‌های بتن آسفالتی تأثیر می‌گذارند که برخی از این عوامل عبارتند از: سرعت خودرو، بار محوری خودرو، فشار تایر، تراکم، ضخامت روسازی و شرایط اقلیمی. همچنین نوع مخلوط آسفالت نقش عمده‌ای در عملکرد روسازی دارد. مشخص شد که مخلوط آسفالت ماستیک سنگی (SMA) در مقایسه با مخلوط دانه بندی متراکم در برابر شیار شدن مقاومت بیشتری دارد، زیرا از اسکلت سنگدانه‌های درشت و همچنین محتوای آسفالت بالاتری تشکیل شده است که تماس سنگ روی سنگ را بین ذرات درشت سنگدانه فراهم می‌کند. (Scheroocman, 1991; Scheroocman, 1992)

تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های آسفالت باعث افزایش مقاومت روسازی در برابر برخی از انواع نابسامانی‌ها می‌شود در حالی که سایر افزودنی‌ها باعث ایجاد یا افزایش انواع دیگر نارسایی‌ها می‌شوند. علاوه بر این، افزودن خاکستر پوسته برنج (RHA) به HMA در تحقیقات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعات مختلف تأثیر استفاده از RHA را در مخلوط‌های آسفالتی داغ بررسی کردند، برخی از آنها از RHA به عنوان درصدی از فیلر در مخلوط‌های سنتی استفاده کردند (Sargun et al, 2013; Goh et al, 2014). همچنین استفاده از RHA به عنوان فیلر در بازیافت روسازی آسفالت بازیافت شده مورد ارزیابی قرار گرفت (Sadeeq et al, 2014). مطالعه دیگری امکان استفاده از سرپاره مس و سنگدانه بتن بازیافتی را به عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های بکر در اصلاح درجه بندی مخلوط‌های بازیافتی سرد ساخته شده با مواد ارزیابی کرد. نه نوع مختلف مخلوط حاوی سه نوع سنگدانه (سنگ آهک و سه نوع افزودنی (سیمان، خاکستر

۲- مواد و مصالح

در این مطالعه از دو نوع فیلر، پودر سنگ آهک (LSD) و RHA به عنوان جایگزین LSD در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. خواص تمام مواد مورد استفاده در بخش زیر ارایه شده است.

۲-۱- مصالح سنگی

سنگدانه درشت مورد استفاده در این تحقیق، سنگ‌های خرد شده از دولومیت می‌باشد. خواص فیزیکی و درجه بندی سنگدانه ریز و درشت استفاده شده در جداول (۱) و (۲) برای مخلوط درجه بندی متراکم سطح سایش نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی

property	Coarse aggregate size (1)	Coarse aggregate size (2)	Fine aggregate (Crushd Sand)	Fine aggregate (Natural Sand)	Minerall Filler
Los Angeles abrasion (%)	27.9	26.2	-	-	-
Bulk (S.G)	2.48	2.402	2.72	2.62	2.75
Saturated and dry surface (S.G)	2.52	2.483	-	-	-
Apparent (S.G)	2.605	2.601	-	-	-
% Water absorption	1.8	3.1	-	-	-

جدول ۲. دانه بندی مصالح سنگی

Sieve Size (Inch)	Sieve Size (mm)	passing %
1"	25.4	100
3/4"	19	86.1
3/8"	9.5	65.9
No. (4)	4.75	49
No. (8)	2.36	42.7
No. (30)	0.6	28.5
No. (50)	0.3	16.4
No. (100)	0.15	8.5
No. (200)	0.075	6.2

۲-۲- قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق از سوئز به دست آمده است. عیار سیمان آسفالت ۷۰/۶۰ با وزن مخصوص ۱,۰۲ که به طور گسترده در ساخت روسازی در ایران استفاده می شود. آزمایش

خصوصیات قیر انجام شده و نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. خصوصیات قیر

property	Result	specification limits
penetration at 25°C, 0.1 mm	63	60-70
Kinematic Viscosity, mm ² /s	367	≥320
Flash point,	264	≥250
Softening point,	47	45-55

۳-۲- خاکستر پوسته برنج

آزمایش XRD^۱ RHA در شکل (۲) نشان داده شده است. الگوهای XRD نمونه‌های تهیه‌شده یک قله تیز کریستالی را در $2\theta = 22^\circ$ با تعدادی پیک با شدت کمتر در $2\theta = 28.2^\circ, 32.5^\circ, 47^\circ, 43^\circ, 54^\circ$ و 58° نشان می‌دهند. همه قله‌ها با الگوی کریستوبالیت به خوبی توصیف می‌شوند. در یک پس زمینه وسیع ناشی از فاز بی‌شکل باقی مانده. از شکل مشخص شد که RHA حاوی مقدار بیشتری از SiO₂ حدود ۸۲٪ است. همچنین آنالیز الکترونیک RHA و LSD در جدول (۵) ارائه شده است.

RHA مورد استفاده در این تحقیق با سوزاندن پوسته برنج در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شد. فرآیند سوختن با قرار دادن پوسته برنج در اون به مدت تقریبی ۲ ساعت انجام شد. رنگ خاکستر جمع‌آوری شده مایل به خاکستری متوسط و ارغوانی روشن و وزن مخصوص آن ۲٫۷۱ است. وقتی دمای فر به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت، خاکستر را از فر خارج کردند تا خنک شود. شکل (۱) هم RHA خام و هم سوخته را نشان می‌دهد. همچنین ترکیب شیمیایی RHA مورد استفاده در جدول (۴) ارائه شده است، در حالی که نتایج

جدول ۴. خصوصیات شیمیایی خاکستر پوسته برنج

Chemical composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	others
Percentage %	82.3	4.05	1.64	9.54	2.08	0.25	0.14

جدول ۵. دانه بندی خاکستر پوسته برنج

Sieve Size (Inch)	Sieve Size (mm)	LSD	RHA	Specification Limits %
		Passing %		
No. 30	0.6	100	100	100
No. 100	0.15	89.5	100	≥85
No. 200	0.075	72.8	100	≥65

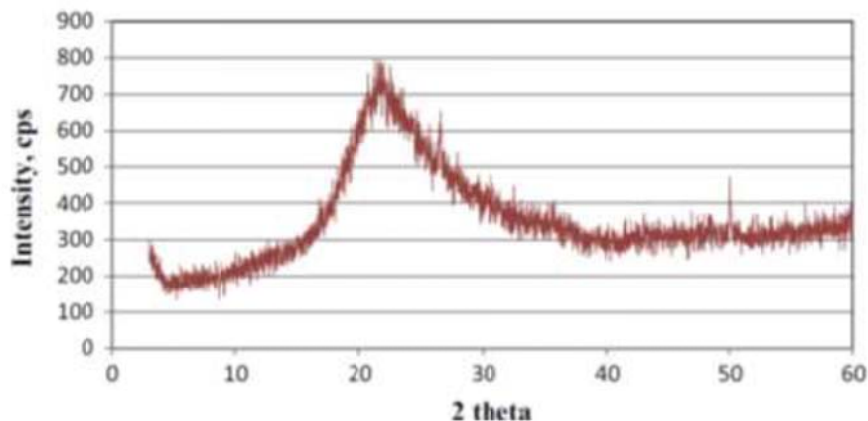


خاکستر پوسته برنج سوخته شده



خاکستر پوسته برنج معمولی

شکل ۱. خاکستر پوسته برنج



شکل ۲. عکس XRD از خاکستر پوسته برنج

۲-۴- برنامه آزمایشگاهی

۲-۴-۱- آزمون مارشال

جریان و سپس ضریب مارشال (MQ) است. MQ را می‌توان با معادله زیر محاسبه کرد.

تست مارشال مطابق با ASTM D6927-15 انجام شد. هدف از آزمون تعیین پارامترهای مارشال به عنوان پایداری،

$$\text{Marshall Quotient (MQ)} = \frac{\text{Marshall Stability}}{\text{Marshall flow}} \quad (1)$$

(ترافیک سنگین) روی هر وجه نمونه با چکش استاندارد که از ارتفاع مشخصی سقوط می‌کرد فشرده شد. نمونه‌ها پس از فشرده‌سازی حداقل ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند. به مدت ۳۰ تا ۴۵ دقیقه سپس نمونه‌ها در دستگاه تست مارشال قرار داده شدند که به وسیله آن پایداری و جریان برای نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

نتایج آزمون مارشال به‌عنوان پایداری، جریان، حفره‌های هوا (AV)، فضای خالی در سنگدانه‌های معدنی (VMA) و وزن واحد برای هر دو مخلوط کنترل و اصلاح‌شده ارزیابی شد. مخلوط‌های اصلاح‌شده حاوی نسبت جایگزینی RHA به عنوان ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ RHA هستند. در این آزمایش حداقل ۳ نمونه برای هر درصد قیر تهیه شد و با ۷۵ ضربه

۲-۴-۲- حساسیت به رطوبت

مورد آزمایش قرار گرفتند. پایداری مارشال حفظ شده یا از دست دادن پایداری (LOS) به عنوان درصدی بین میانگین پایداری نمونه‌های گروه دوم (غوطه‌ور) نسبت به میانگین پایداری برای نمونه‌های گروه اول (پایداری مارشال) محاسبه شد. همانطور که در معادله زیر ذکر شده است:

مقاومت در برابر آسیب رطوبت یکی از مهمترین خواصی است که باید در مخلوط آسفالتی موجود باشد. این ویژگی در این مطالعه مطابق با ASTM D1559-89 بررسی شد. پنج نمونه مختلف مارشال (۵×۳) با همان روش آزمایش مارشال تهیه شد و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب غوطه‌ور شدند و سپس نمونه‌ها با همان روش تست پایداری مارشال

$$\text{(LOS)\%} = \left(1 - \frac{\text{stability of wet specimens}}{\text{stability of dry specimens}}\right) \times 100 \quad (2)$$

۲-۴-۳- تست مقاومت کششی غیر مستقیم

یکنواخت عمود بر جهت بار اعمال شده در امتداد صفحه قطری عمودی ایجاد می‌کند. این استحکام کششی با شکافتن یا پارگی در امتداد قطر عمودی باعث از کار افتادن نمونه می‌شود. تست ITS با استفاده از دستگاه مارشال انجام می‌شود. بار شکست برای هر نمونه ثبت می‌شود و مقدار ITS به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ITS = \frac{2F}{\pi HD}$$

که F بار شکست (KN، H ضخامت نمونه (متر) و D قطر نمونه (متر) است.

و مرطوب اندازه گیری شد. TSR با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود که در آن TSR نسبت مقاومت کششی (%/.) است، Stm استحکام خیس یا مقاومت کششی متوسط نمونه‌های دارای رطوبت است، (کیلوپاسکال) و Std مقاومت خشک یا مقاومت کششی متوسط نمونه‌های خشک (کیلوپاسکال) است.

$$TSR = \frac{S_{tm}}{S_{td}} \times 100.$$

را اندازه‌گیری می‌کند. نمونه ابتدا با مخلوط کردن مواد در دمای اختلاط مناسب و سپس فشرده‌سازی مخلوطها توسط یک غلتک فولادی به وزن ۵۳ کیلوگرم به مدت ۱۴ سیکل تهیه می‌شود و سپس نمونه به مدت ۲۴ ساعت خنک می‌شود. پنج نمونه با ابعاد ۳۰،۵×۳۰،۵×۵ سانتی‌متر تهیه شد. نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شدند.

شیار و خستگی در راهنمای طراحی مکانیکی - تجربی روسازی استفاده می‌شود. عوامل زیادی بر مقادیر مدول دینامیکی مانند درجه‌بندی سنگدانه‌ها، فضاها خالی هوای مخلوط، مدول دینامیکی برشی بایندر G*، ویسکوزیته بایندر و غیره تأثیر می‌گذارند. بنابراین در این مطالعه، آزمایش برای

آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) بر روی هر دو نمونه کنترل و اصلاح شده مطابق با روش آزمایش ASTM D6931 انجام شد. تست ITS به طور مستقیم با خواص ترک خوردگی روسازی مرتبط است. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم شامل بارگذاری یک نمونه استوانه ای با بارهای فشاری است که موازی و در امتداد صفحه قطری عمودی عمل می‌کند. این پیکربندی بارگذاری یک تنش کششی نسبتاً

(۳)

نسبت مقاومت کششی (TSR)، این ویژگی در این مطالعه بررسی شد. این آزمایش برای تعیین اثر اشباع و تهویه آب تسریع شده بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های استوانه‌ای استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش، شش نمونه از هر مخلوط تهیه شد و به طور مساوی به نمونه‌های شرطی شده و خشک گروه بندی شدند. این آزمایش مطابق با ASTM D4867 انجام شد. تمام نمونه‌ها در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد آزمایش شدند و مقادیر ITS برای نمونه‌های خشک

(۴)

۲-۴-۴- تست شیار جای چرخ

این آزمایش اطلاعاتی در مورد میزان تغییر شکل دائمی از یک بار متمرکز متحرک مطابق با AASHTO T324 ارایه می‌دهد. یک متراکم کننده آزمایشگاهی برای تهیه نمونه‌های دال طراحی شده است. این آزمایش برای تعیین حساسیت شکست زودرس HMA به دلیل ضعف در ساختار سنگدانه، سفتی ناکافی قیر یا آسیب رطوبت استفاده می‌شود. این آزمایش عمق شیار و تعداد دفعات عبور یا زمان رسیدن به عمق شیار نهایی

۲-۴-۵- آزمون مدول دینامیک (|E*|) و عدد روانی

مدول دینامیک (مختلط) یک پارامتر حیاتی است که در ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مختلف استفاده می‌شود. این آزمایش مطابق با AASHTO TP62 انجام شد. مدول دینامیکی |E*| یکی از پارامترهایی است که برای ارزیابی هر دو پیش‌بینی مشکلات ترک خوردگی

با مراجعه به نتایج ارائه شده در جدول (۵)، مشخص شد که مقادیر پایداری مارشال با افزایش درصد RHA همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است تا ۷۵٪ RHA افزایش یافته است. بالاترین مقدار پایداری در ۷۵٪ RHA با ۹,۷۲٪ ثبت شد. همچنین، نتایج تمام پارامترهای مارشال (AV٪، VMA، واحد وزن و جریان) با محدودیت های مشخصات مطابق با استانداردهای ایران مطابق جدول (۶) مطابقت دارد. از سوی دیگر، در ۵۰٪ RHA افزایش پایداری مارشال ۷,۳۱٪ بود که مناسب تر است زیرا مقدار MQ آن ۴۸۱,۴۰ کیلوگرم بر میلی متر بود، زیرا بر اساس مشخصات وزارت حمل و نقل جاده ای و وزارت حمل و نقل راه، مقدار MQ آن ۴۸۱,۴۰ کیلوگرم بر میلی متر بود. همچنین افزودن RHA باعث تغییر OBC شد که به دلیل افزایش مصرف قیر کمی نسبت به مخلوط شاهد افزایش یافت زیرا RHA ریزتر از LSD است که منجر به افزایش سطح فیلر معدنی می شود.

مخلوط های معمولی و اصلاح شده انجام شد. آزمایش عدد جریان در دمای ۵۴/۴ درجه سانتیگراد در بارگذاری فشاری مکرر (یک چرخه با زمان بارگذاری ۰,۱ ثانیه و زمان استراحت ۰,۹ ثانیه) برای اندازه گیری کرنش های دائمی انباشته عمودی به عنوان تابعی از چرخه های بارگذاری پس از انجام آزمایش E* انجام شد. آزمایش نشان دهنده مقاومت شیاردار است. بنابراین، آن را بر روی هر دو مخلوط کنترل و اصلاح شده انجام شد.

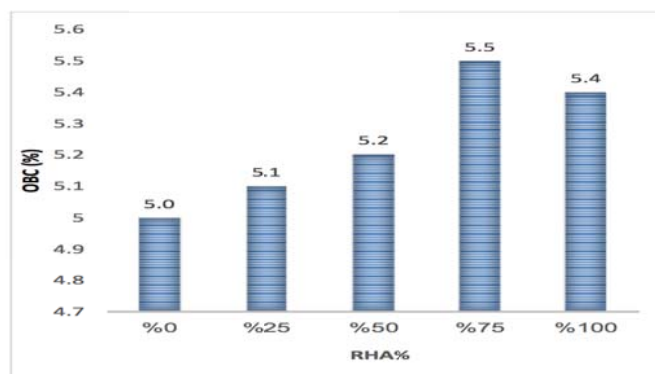
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون مارشال

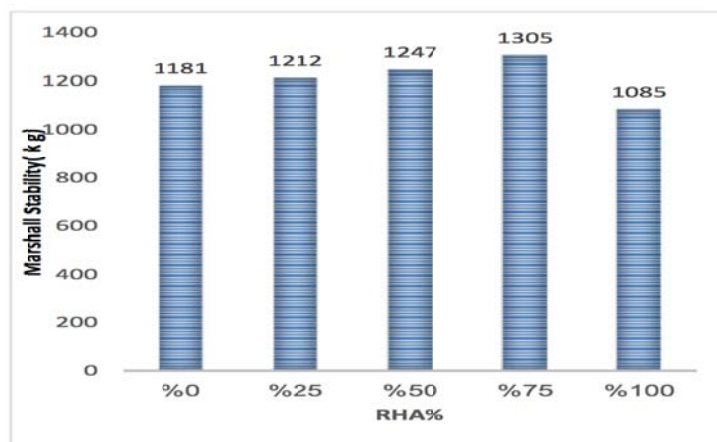
اولین مرحله در آزمایش مارشال، تعیین محتوای بهینه قیر (OBC) است. در این تحقیق مقادیر OBC برای تمام مخلوط های مورد بررسی (معمولی و اصلاح شده) تعیین شد. همچنین خواص مارشال برای هر دو مخلوط کنترل و اصلاح شده (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) مطابق جدول (۶) تعیین و گزارش شد. همچنین شکل های (۳) تا (۹) نتایج تست مارشال را در مقادیر مختلف RHA نشان می دهند.

جدول ۶. نتایج آزمایش مارشال

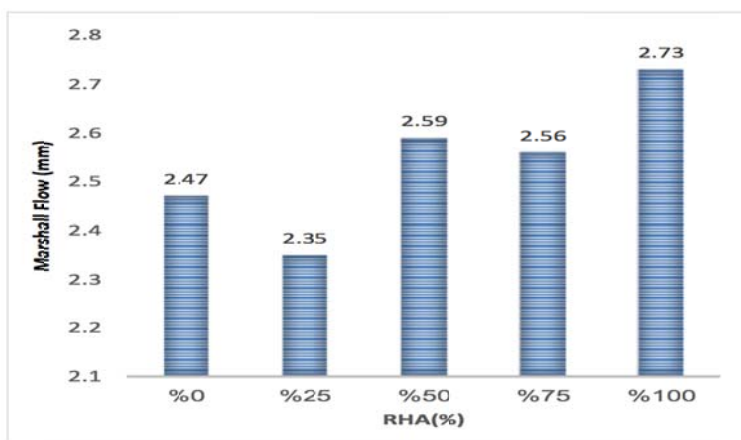
Property	Control mix	25%RHA	50%RHA	75%RHA	100%RHA	Specification limits
Stability (Kg)	1181	1212	1247	1305	1085	Min 900
Flow (mm)	2.47	2.35	2.59	2.56	2.73	2 to 4
Air voids %	4.27	4.2	4.1	3.24	3.5	3 to 5
Unit Weigth (gm/cm ³)	2.311	2.34	2.305	2.322	2.317	-
VMA %	15.07	15.1	15.45	15.11	15.2	Min 15
OBC %	5	5.1	5.2	5.5	5.4	3.5-7
MQ (kg/mm)	477.5	515.76	481.4	524.7	397.4	-



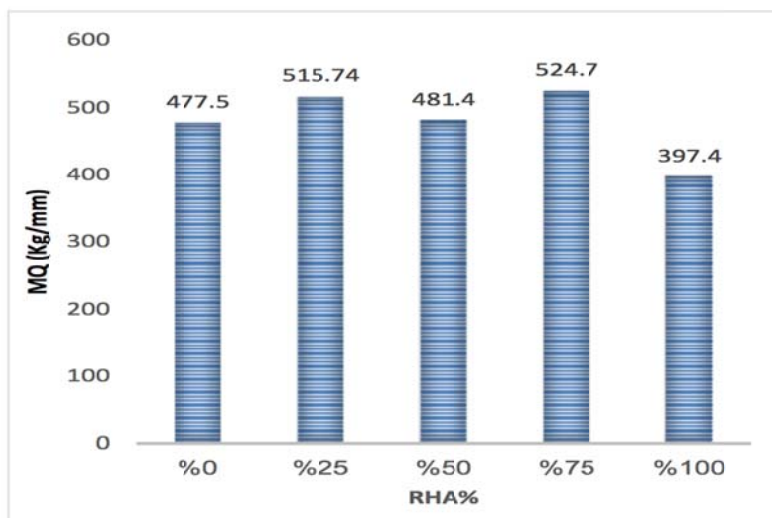
شکل ۳. نتایج درصد قیر بهینه



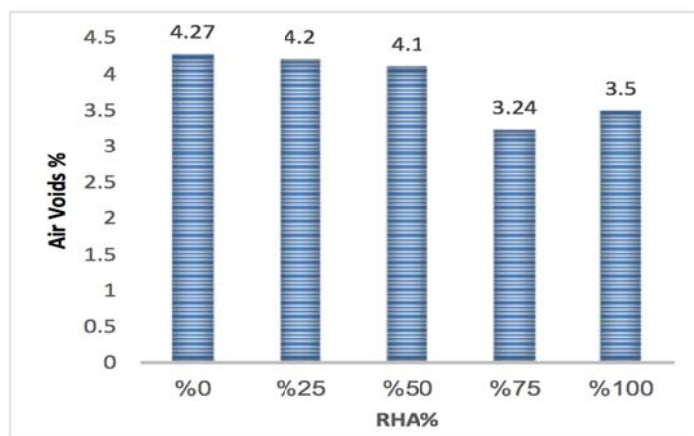
شکل ۴. نتایج استقامت مارشال



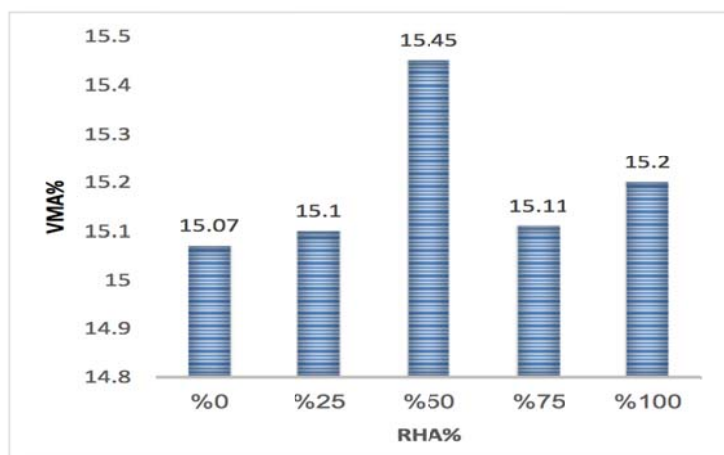
شکل ۵. نتایج روانی مارشال



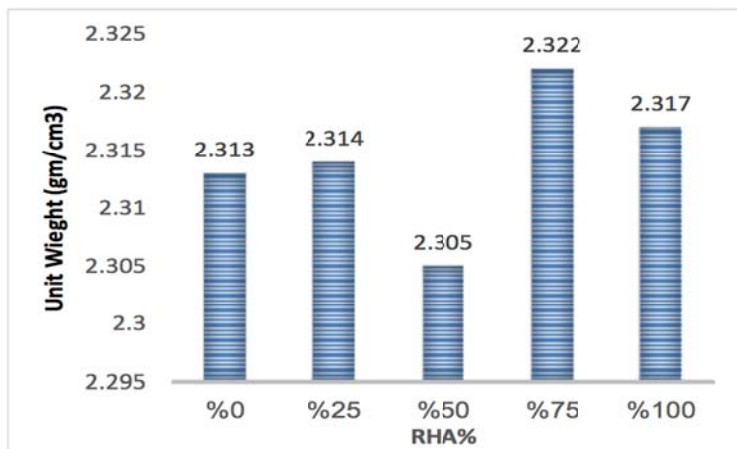
شکل ۶. نسبت مارشال



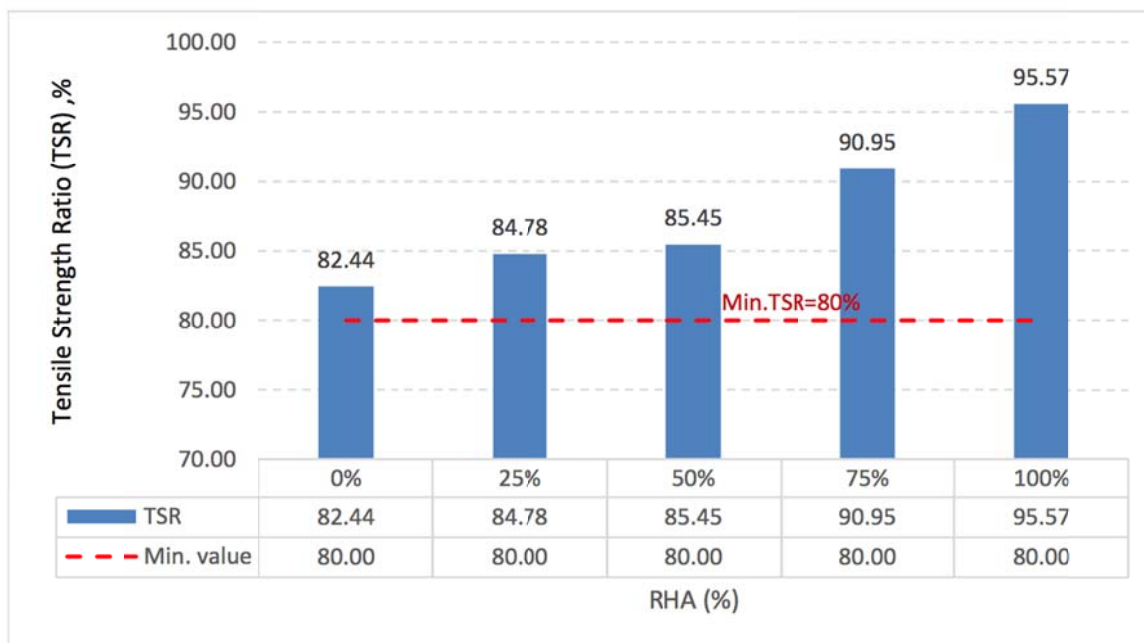
شکل ۷. نتایج درصد هوا برای نمونه‌های مختلف



شکل ۸. نتایج درصد فضای خالی مصالح سنگی نمونه‌ها



شکل ۹. نتایج وزن مخصوص نمونه‌ها



شکل ۱۲. نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها

۳-۴- نتایج تست شیار جای چرخ

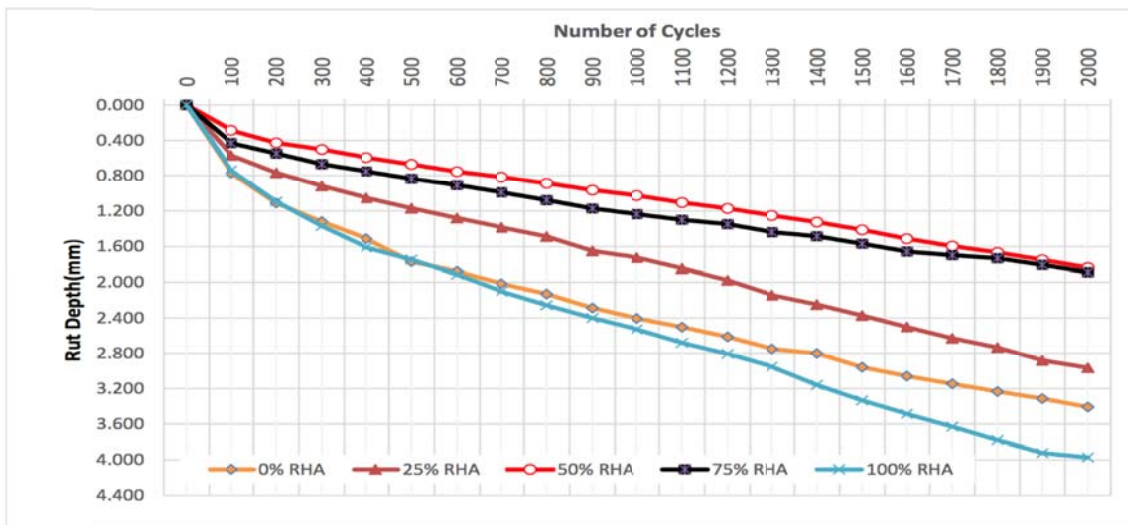
افزودن RHA به مخلوط‌های آسفالتی بهبود قابل توجهی رخ داده است. افزودن ۵۰٪ RHA بیشترین کاهش را در عمق شیار نسبت به سایر مخلوط‌های اصلاح شده به همراه داشت که در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

شکل (۱۳) رابطه بین عمق شیار بر حسب میلی متر و تعداد چرخه‌ها را برای همه مخلوط‌ها نشان می‌دهد. در حالی که شکل (۱۴) حداکثر عمق شیار را در درصد‌های مختلف RHA نشان می‌دهد. نتایج آزمایش ردیابی چرخ نشان داد که با

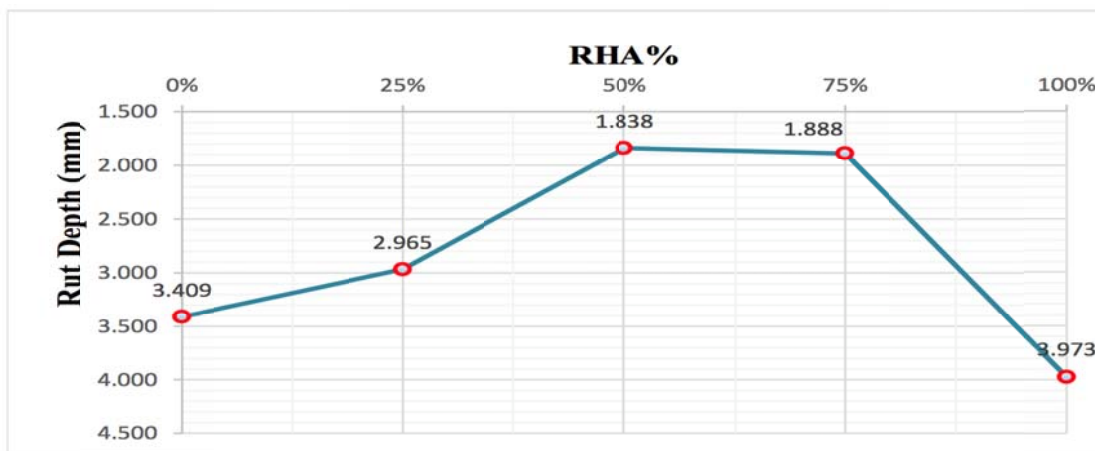
۳-۵- نتایج آزمایش‌های مدول دینامیکی (E^*) و تعداد جریان (FN)

می‌توان آن را درصد بهینه RHA در نظر گرفت. در حالی که شکل (۱۷) نتایج عدد روانی را برای مخلوط‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد که عملکرد HMA با افزودن RHA افزایش می‌یابد. تست عدد روانی نشان دهنده مستقیم مقاومت شیاردار همانطور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، بالاترین مقدار عدد روانی در ۵۰٪ RHA نسبت به سایر RHA تعیین شد. این نتایج مقادیر تست ردیابی چرخ را تأیید می‌کند که درصد بهینه RHA را در برابر شیار شدن ۵۰ درصد در نظر می‌گیرد. شکل (۱۷) کرنش دائمی انباشته شده را در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ RHA بهترین عملکرد را در برابر شیارشدگی نسبت به شاهد و سایر RHA داشتند.

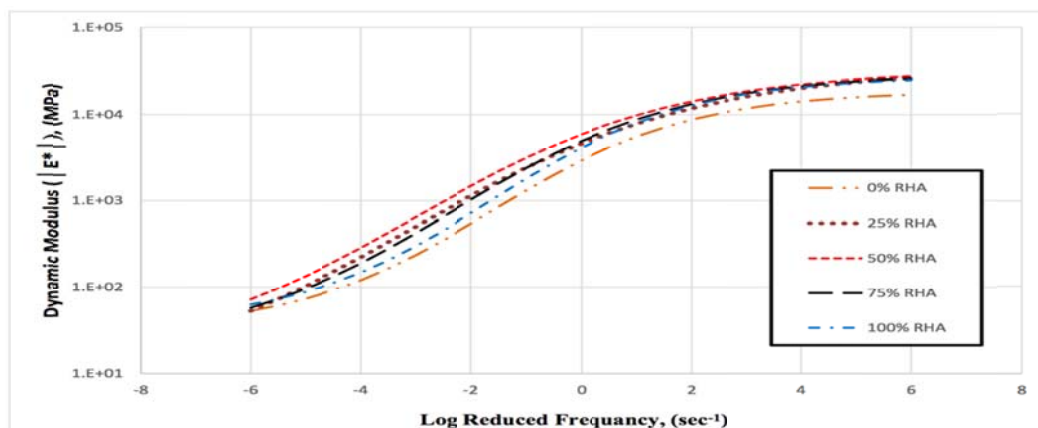
شکل (۱۵) مقادیر نتایج مدول دینامیکی را برای هر دو مخلوط کنترل و اصلاح شده نشان می‌دهد. منحنی اصلی برای هر مخلوط با تغییر مقادیر در مورد دمای مرجع ۲۱,۱ درجه سانتیگراد ایجاد شد. (۷۰ درجه فارنهایت). از شکل قبل، مشخص شد که مخلوط‌هایی که حاوی RHA هستند عملکرد بهتری نسبت به مخلوط کنترل دارند. نتایج نشان داد که افزودن RHA به طور قابل توجهی مقادیر E^* را در مقایسه با مخلوط شاهد افزایش داد. این نتایج نشان داد که افزودن RHA به HMA باعث بهبود عملکرد مخلوط‌های اصلاح شده در برابر شیار و ترک در دماها و فرکانس‌های مختلف می‌شود. این نتایج با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم و ردیابی چرخ سازگار است. بالاترین مقدار E^* در ۵۰٪ RHA یافت شد که تقویت می‌کند که



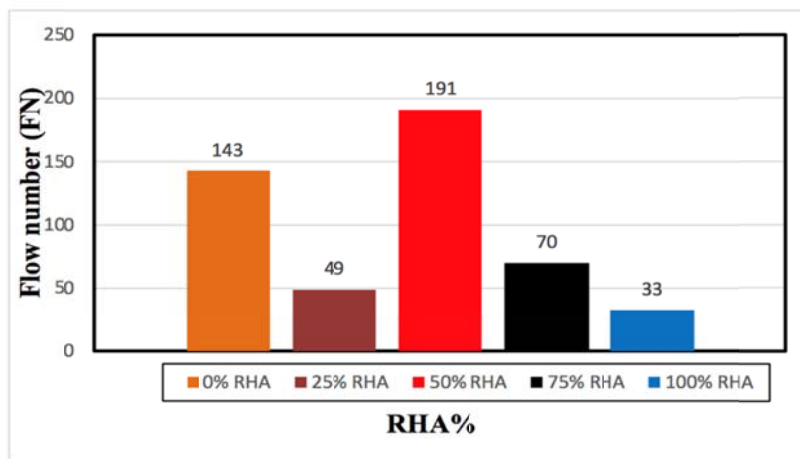
شکل ۱۳. نتایج عمق شیار نمونه‌ها



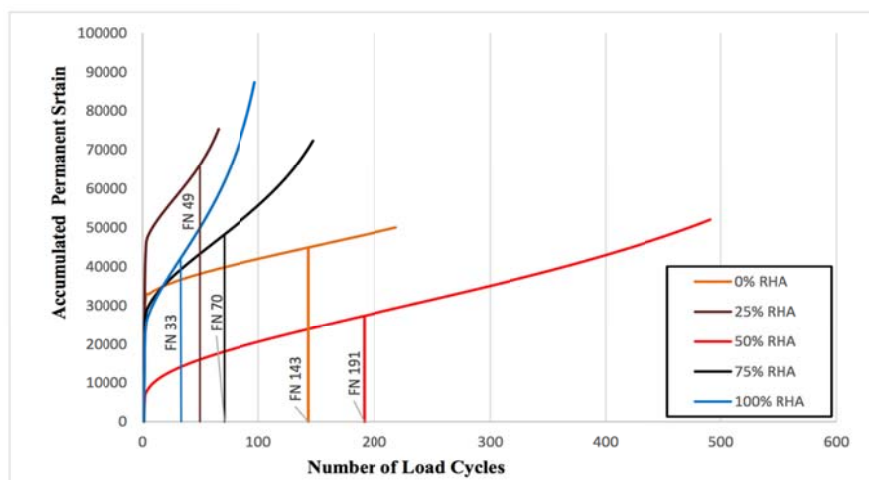
شکل ۱۴. حداکثر عمق شیار نمونه‌ها



شکل ۱۵. نتایج مدول دینامیکی نمونه‌ها



شکل ۱۶. نتایج عدد روانی نمونه‌ها



شکل ۱۷. کرنش دائمی تجمعی و عدد روانی نمونه‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

بهبود یافتند. نتایج تجربی نشان داد که ۵۰٪ RHA درصد بهینه برای شرایط مهندسی است که به طور بالقوه می‌تواند به عنوان جایگزین LSD استفاده شود. همچنین، افزودن RHA به HAM مقادیر $|E|$ و FN را افزایش داد که نشان می‌دهد عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ در برابر ترک‌ها و شیارها بهبود یافته است.

این تحقیق نشان داد که RHA را می‌توان در روسازی‌های بتنی آسفالتی برای جایگزینی کامل یا جزئی فیلر معدنی (LSD) استفاده کرد. همه مخلوط‌های RHA مورد بررسی، مقادیر قابل قبولی را برای تمام آزمایش‌های ارزیابی شده بر اساس استانداردهای ایران با استفاده از مخلوط درجه‌بندی شده ۴ تولید کردند. افزودن RHA به HMA خواص مهندسی به عنوان ITS و مقاومت شیاردار را افزایش داد. همچنین پارامترهای مارشال با افزودن RHA نسبت به مخلوط شاهد

- 1- Rice Husk Ash
- 2- Hot Mix Asphalt
- 3- Lime Stone Dust
- 4- Optimum Bitumen Content
- 5- Indirect Tensile Strength Test
- 6- Wheel Track Test
- 7- Crumb Rubber Powder
- 8- Stone Matrix Asphalt
- 9- Coal Waste Ash
- 10- X-Ray Diffraction
- 11- Marshall Quotient

۶- مراجع

- Goh, Boon Hoe, Pushan Sunnasee, Kok Hon Chin, Byung Gyoo Kang, and Sien Ti Kok, (2014), "Utilisation of rice husk ash in asphaltic concrete pavement." In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd., Vol. 1030, pp. 961-964.
- Mistry, Raja, Sandip Karmakar, and Tapas Kumar Roy, (2019), "Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt", *Road Materials and Pavement Design* 20, No. 4, pp.979-990.
- Scherocman, J. A., (1991), "Stone mastic asphalt reduces rutting", *Better Roads* 61, No. 11.
- Scherocman, James A., (1992), "Construction of Stone Mastic Asphalt Test Sections in the US (With Discussion)", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 61.
- Sargın, Şebnem, Mehmet Saltan, Nihat Morova, Sercan Serin, and Serdal Terzi, (2013), "Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete", *Construction and Building Materials* 48, pp.390-397.
- Sadeeq, Jaafar Abubakar, Jibrin Mohammed Kaura, Ochebo Joshua, and Ahmad Rabilu, (2014), "Recycling of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) with Rice Husk Ash (RHA)", *Jordan Journal of Civil Engineering* 8, No. 4.
- Abdelmagid, Alaaeldin AA., and Cheng Pei Feng., (2019), "Evaluating the effect of rice-husk ash and crumb-rubber powder on the high-temperature performance of asphalt binder", *Journal of Materials in Civil Engineering* 31, No. 12, 04019296.
- Al-Hdabi, Abbas, (2016), "Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler", *Construction and Building Materials* 126, pp.544-551.
- Akter, Rocksana, and Md Kamal Hossain, (2018), "Influence of rice husk ash and slag as fillers in asphalt concrete mixes." *American Journal of Engineering Research (AJER)* 6, No. 1, pp.303-311.
- Ameli, Alireza, Rezvan Babagoli, Navid Norouzi, Farhang Jalali, and Farzin Poorheydari Mamaghani, (2020), "Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture", *Construction and Building Materials* 236, 117557.
- Behnood, Ali, Mahsa Modiri Gharehveran, Farhad Gozali Asl, and Mahmoud Ameri, (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", *Construction and Building Materials* 96, pp. 172-180.

Effect of Artificial Pozzolanic Material on the Performance of Hot Asphalt Mixes

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

Email: ameli@gmail.com

Received: February 2023- Accepted: April 2023

ABSTRACT

In this paper, using rice husk ash (RHA) in hot mix asphalt (HMA) as filler was evaluated. The main aim of replacing mineral filler is enhancing the performance of asphalt mixes and producing an economical asphalt mix. For this purpose, five different mixes were prepared; the first was a control mix (traditional mix) containing 100% Lime Stone Dust (LSD) as filler and 0% RHA. While, the other mixes contain 25%, 50%, 75% and 100% of RHA as a percentage of the filler weight. Optimum bitumen content (OBC) was determined using Marshall test, also all Marshall parameters (Stability, Air Voids, Voids in Mineral Aggregate, Unit Weight and Flow) were examined. Indirect Tensile Strength Test (ITST) and Wheel Tracking Test (WTT) were conducted and their results were analyzed. Dynamic modulus ($|E^*|$) is considered an important parameter used in mechanistic-empirical pavement design. The $|E^*|$ is measured at different temperature/frequency combinations. Dynamic modulus ($|E^*|$) and phase angle (δ) are used for the visco-elastic characterization of HMA. Thus, these properties were measured for mixes with and without RHA. The results indicate that RHA has the potential to be used as partial substitution of mineral filler LSD in pavement construction. Adding RHA enhances Marshall Stiffness, reduces rut depth and increases indirect tensile strength values. Further, a significant change has been occurred in OBC for all mixes and the optimum replacement ratio is recorded as 50% RHA: 50% LSD. Finally, mixes containing RHA show higher dynamic modulus values and flow number.

Keywords: Rice Husk Ash, Hot Asphalt Mixes, Dynamic Modulus (E^*), Marshall Test, Rut Depth, Indirect Tensile Strength