

## ارزیابی تجربی خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی به عنوان فیلرهای جایگزین در مخلوط آسفالت گرم

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، 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 الکترونیک نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

صفحه ۳۳۵-۳۲۳

### چکیده

توجه روزافزون به حفاظت از محیط زیست توجه جامعه را بر استفاده مجدد احتمالی از ضایعات مختلف کشاورزی و صنعتی در راهسازی متمرکز کرده است. این مطالعه تحقیقاتی اثر استفاده از ضایعات مانند خاکستر پوسته برنج ( $RHA^1$ ) و خاکستر بادی ( $FA^2$ ) را به عنوان جایگزین آهک هیدراته معمولی ( $HL^3$ ) به عنوان فیلر در مخلوط آسفالت گرم ( $HMA^4$ ) نشان می‌دهد. در ابتدا، نمونه‌های مخلوط قیری دانه بندی پیوسته ( $DBM^5$ ) در آزمایشگاه با نسبت‌های متفاوت از ۲٪ تا ۸٪  $RHA$  و  $FA$  با روش طرح اختلاط مارشال ساخته شدند و نتایج با مخلوط کنترل تهیه شده با استفاده از ۲٪  $HL$  مقایسه شد. عملکرد مخلوط‌های مذکور از طریق نسبت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی عملکرد بهتر  $HMA$  را با افزودن  $RHA$  و  $FA$  نشان می‌دهد و همچنین نشان داد که مقرون به صرفه است، زیرا درصد قیر بهینه به میزان ۷٫۵ درصد نسبت به مخلوط کنترل کاهش می‌یابد که در نسبت فیلر ۸ درصد می‌باشد. علاوه بر این،  $RHA$  میل بیشتری به قیر نشان می‌دهد که بیشترین اثر سفت کننده قطرات ماستیک قیر را نسبت به سایر فیلرهای استفاده شده با سازگاری خوب در سطح میکرو با برآورده کردن معیار ضروری نسبت می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فیلر، خاکستر پوسته برنج، خاکستر بادی، طراحی مخلوط مارشال، نسبت مقاومت کششی، میکروسکوپی نوری

### ۱-مقدمه

(Read & Whiteoak, 2003). با جزئیات بیشتر، سنگدانه‌هایی که بزرگتر از ۲٫۳۶ میلی‌متر هستند، درشت در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که آنهایی که کوچکتر از ۲٫۳۶ میلی‌متر هستند، سنگدانه‌های ریز هستند (هیئت تحقیقات حمل و نقل، ۲۰۱۱). فیلر به ذرات سنگدانه‌ای اشاره دارد که

مخلوط آسفالت گرم ( $HMA$ )، به طور کلی، شامل سه جزء است: سنگدانه‌ها در اندازه‌های مختلف، قیر و حفره‌های هوا. در حالی که سنگدانه‌ها اساساً به عنوان یک اسکلت عمل می‌کنند، قیر اثر چسبندگی را در بین ذرات سنگدانه ایجاد می‌کند و به خواص ویسکو الاستیک به مخلوط کمک می‌کند.

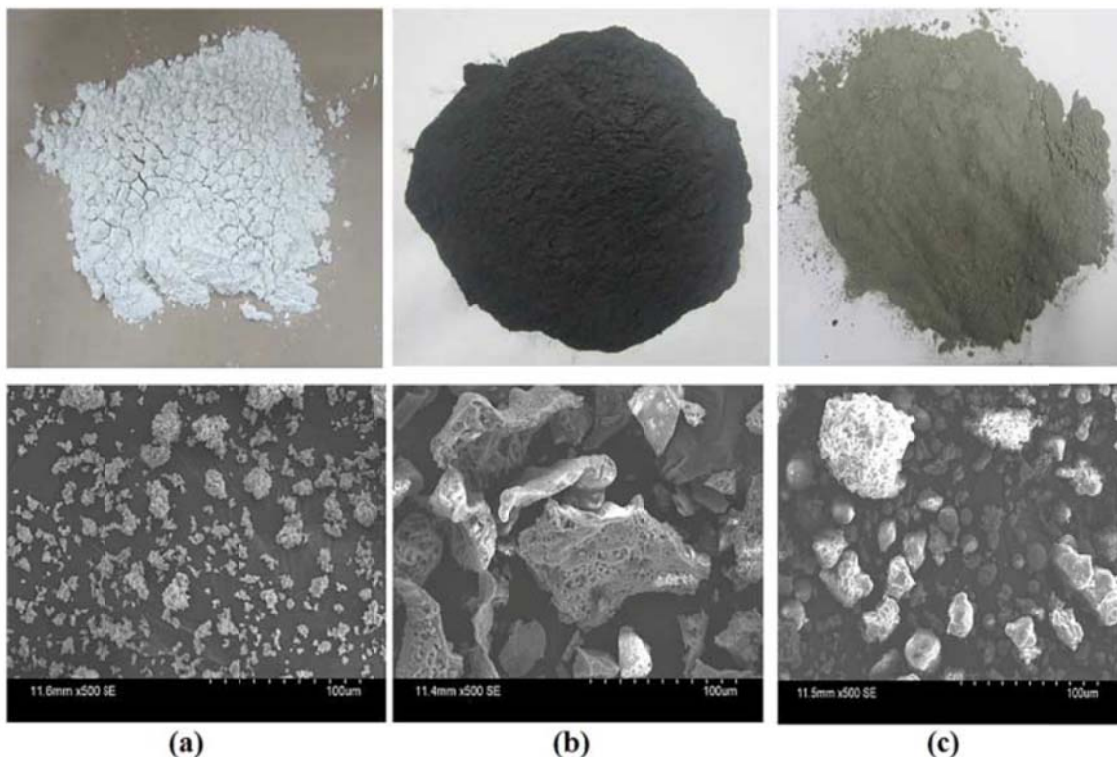
از طریق الک ۷۵ میکرومتر IS الک شده‌اند (وزارت حمل و نقل جاده‌ای و بزرگراه، ۲۰۱۳). فیلر پودر بسیار ریز مورد استفاده در مخلوط قیری است که تأثیر زیادی بر عملکرد حین سرویس HMA دارد. با نقش دوگانه در مخلوط، شکاف بین سنگدانه‌های معدنی را پر می‌کند و به دلیل ریزی که دارد با قیر مخلوط می‌شود و ماستیک قیری با قوام بالا را تشکیل می‌دهد. این ماستیک به دست آمده قادر است تا حد زیادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط تأثیر بگذارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پر کردن حجم، ساختاری شدن ذرات و فعل و انفعالات فیزیک و شیمیایی سه مکانیسم اصلی اثر تقویت‌کننده فیلرها در ماستیک قیری هستند (Clopotel, Velasquez, Bahia & Kim, 2012; Kim & Underwood, 2011). از آنجایی که هم پر کردن حجم و هم ساختارسازی ذرات ابزاری برای تقویت مکانیکی هستند، ذرات فیلر شروع به تشکیل یک شبکه به هم پیوسته می‌کنند که منجر به افزایش سریع نرخ سفت شدن با افزایش کسر حجمی می‌شود (آندروود و کیم، ۲۰۱۱). از سوی دیگر، برهمکنش فیزیکوشیمیایی شامل جذب گروه‌های قطبی (آسفالتین‌ها و رزین‌ها) قیر بر روی سطح ذرات فیلر از طریق نیروهای الکترواستاتیکی، دوقطبی-دوقطبی یا واندروالس است (Clopotel et al., 2012; Fritschy & Papirer, 1978). بنابراین نه تنها مشاهده مکانیسم‌های تقویت مکانیکی فیلرها از طریق ارزیابی مکانیکی HMA، بلکه همچنین درک تأثیر قیلر بر مورفولوژی بایندر ضروری است. انواع مختلفی از فیلرها از جمله سنگ خرد شده، سیمان و آهک را می‌توان در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد (ASTM D242، ۲۰۰۹؛ MORT&H، 2013). نگرانی روزافزون جامعه برای حفاظت از محیط زیست منجر به توجه متمرکز بر استفاده مجدد احتمالی در ساخت و ساز جاده شد (Melotti, Santagata, Bassani, Salvo, & Rizzo, 2013). در حال حاضر مطالعات زیادی در مورد استفاده از مواد زائد وجود دارد، به عنوان مثال پودر سنگدانه‌های ریز بازیافت شده، گرد و غبار آجر، پودر شیشه، خاکستر لجن فاضلاب، غبار مرمَر، آهک ضایعات و پودر زغال سنگ (Al-sayed, Mandy, & Bauli, 1995; Chandra, Kumar, & Feyissa, 2002; Chen, Lin, & Wu, 2011; Chen, Lin, Wu, & Liu, 2011; Do, Mun, & Keun, 2008; Modarres & Rahamanzadeh, 2014; Sobolev, Vivian, Saha, Wasiuddin, & Saltibus, 2014; Tremblay, Vaillancourt, & Perraton, 2015). علاوه بر یا به جای یک فیلر معمولی در تولید HMA. امروزه حجم زیادی از ضایعات صنعتی و کشاورزی، به عنوان مثال، خاکستر بادی (FA)، خاکستر پوسته برنج (RHA) و غیره که هر ساله در سراسر جهان تولید می‌شود، نه تنها خطرات تجمع در نزدیکی گیاهان را ایجاد می‌کند، بلکه محیط زیست را نیز آلوده می‌کند (Roy, 2013). تخمین زده می‌شود که هند هر سال ۱۴۰ میلیون تن FA (Chandra et al., 2002) و ۴,۵ میلیون تن RHA تولید می‌کند. (Mistry & Roy, 2015). خاکستر بادی به عنوان یک فیلر معدنی در مخلوط قیری برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ معرفی شد (carpenter, 2015). از آن زمان بسیاری از محققین اثر سودمند FA بر مقاومت در برابر رطوبت، عمر خستگی، مقاومت شیاردار و استحکام کششی مخلوط قیری را بررسی کرده‌اند (Asi & Assaad, 2005; Carpenter, 1952; Suheibani, 1986; Tons, Goetz, & Razi, 1983; Xiao, Shivaprasad, & Amirkhanian, 2012). RHA محصول جانبی تولید شده در طی احتراق پوسته برنج در تاسیسات احتراق است (Arabani, Tahami, & Taghipoor, 2016). با این حال، علیرغم محبوبیت RHA به عنوان یک ماده سیمانی جایگزین در بتن (Chindaprasirt, Rukzon, & Sirivivatnanon, 2008; Metha, 1977)، شده است که RHA را به عنوان یک فیلر در مخلوط قیر در نظر می‌گیرند. ارزیابی RHA به عنوان جایگزینی جزئی فیلر معمولی مورد بررسی قرار گرفت (Sargin, Saltan, 2013). Morova, Serin, & Terzi, 2013). کار تحقیقاتی دیگری برای استفاده از RHA همراه با پودر شیشه زباله و گرد و غبار آجر به عنوان فیلر در HMA برجسته شد، اما هیچ نتیجه قابل توجهی در عملکرد مخلوط RHA در مقایسه با مخلوط کنترل یافت نشد. (Arabani et al., 2016). بنابراین، یک تحقیق برای به دست آوردن درک اساسی از اثرات RHA و FA به عنوان فیلرهای جایگزین در HMA با ارزیابی طراحی مخلوط و خواص مکانیکی مخلوط قیری هدف قرار گرفته است. این مطالعه همچنین با هدف جستجوی بینشی در مورد مکانیسم اثر تقویت‌کننده فیلر در ماستیک قیری از طریق میکروسکوپ نوری است.

از طریق الک ۷۵ میکرومتر IS الک شده‌اند (وزارت حمل و نقل جاده‌ای و بزرگراه، ۲۰۱۳). فیلر پودر بسیار ریز مورد استفاده در مخلوط قیری است که تأثیر زیادی بر عملکرد حین سرویس HMA دارد. با نقش دوگانه در مخلوط، شکاف بین سنگدانه‌های معدنی را پر می‌کند و به دلیل ریزی که دارد با قیر مخلوط می‌شود و ماستیک قیری با قوام بالا را تشکیل می‌دهد. این ماستیک به دست آمده قادر است تا حد زیادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط تأثیر بگذارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پر کردن حجم، ساختاری شدن ذرات و فعل و انفعالات فیزیک و شیمیایی سه مکانیسم اصلی اثر تقویت‌کننده فیلرها در ماستیک قیری هستند (Clopotel, Velasquez, Bahia & Kim, 2012; Kim & Underwood, 2011). از آنجایی که هم پر کردن حجم و هم ساختارسازی ذرات ابزاری برای تقویت مکانیکی هستند، ذرات فیلر شروع به تشکیل یک شبکه به هم پیوسته می‌کنند که منجر به افزایش سریع نرخ سفت شدن با افزایش کسر حجمی می‌شود (آندروود و کیم، ۲۰۱۱). از سوی دیگر، برهمکنش فیزیکوشیمیایی شامل جذب گروه‌های قطبی (آسفالتین‌ها و رزین‌ها) قیر بر روی سطح ذرات فیلر از طریق نیروهای الکترواستاتیکی، دوقطبی-دوقطبی یا واندروالس است (Clopotel et al., 2012; Fritschy & Papirer, 1978). بنابراین نه تنها مشاهده مکانیسم‌های تقویت مکانیکی فیلرها از طریق ارزیابی مکانیکی HMA، بلکه همچنین درک تأثیر قیلر بر مورفولوژی بایندر ضروری است. انواع مختلفی از فیلرها از جمله سنگ خرد شده، سیمان و آهک را می‌توان در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد (ASTM D242، ۲۰۰۹؛ MORT&H، 2013). نگرانی روزافزون جامعه برای حفاظت از محیط زیست منجر به توجه متمرکز بر استفاده مجدد احتمالی در ساخت و ساز جاده شد (Melotti, Santagata, Bassani, Salvo, & Rizzo, 2013). در حال حاضر مطالعات زیادی در مورد استفاده از مواد زائد وجود دارد، به عنوان مثال پودر سنگدانه‌های ریز بازیافت شده، گرد و غبار آجر، پودر شیشه، خاکستر لجن فاضلاب، غبار مرمَر، آهک ضایعات و پودر زغال سنگ (Al-sayed, Mandy, & Bauli, 1995; Chandra, Kumar, & Feyissa, 2002; Chen, Lin, & Wu, 2011; Chen, Lin, Wu, & Liu, 2011; Do, Mun, & Keun, 2008; Modarres & Rahamanzadeh, 2014; Sobolev, Vivian, Saha, Wasiuddin, & Saltibus, 2014; Tremblay, Vaillancourt, & Perraton, 2015). علاوه بر یا به جای یک فیلر معمولی در تولید HMA. امروزه حجم زیادی از ضایعات صنعتی و کشاورزی، به عنوان مثال، خاکستر بادی (FA)، خاکستر پوسته برنج (RHA) و غیره که هر ساله در سراسر جهان تولید می‌شود، نه تنها خطرات تجمع در نزدیکی گیاهان را ایجاد می‌کند، بلکه محیط زیست را نیز آلوده می‌کند (Roy, 2013). تخمین زده می‌شود که هند هر سال ۱۴۰ میلیون تن FA (Chandra et al., 2002) و ۴,۵ میلیون تن RHA تولید می‌کند. (Mistry & Roy, 2015). خاکستر بادی به عنوان یک فیلر معدنی در مخلوط قیری برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ معرفی شد (carpenter, 2015). از آن زمان بسیاری از محققین اثر سودمند FA بر مقاومت در برابر رطوبت، عمر خستگی، مقاومت شیاردار و استحکام کششی مخلوط قیری را بررسی کرده‌اند (Asi & Assaad, 2005; Carpenter, 1952; Suheibani, 1986; Tons, Goetz, & Razi, 1983; Xiao, Shivaprasad, & Amirkhanian, 2012). RHA محصول جانبی تولید شده در طی احتراق پوسته برنج در تاسیسات احتراق است (Arabani, Tahami, & Taghipoor, 2016). با این حال، علیرغم محبوبیت RHA به عنوان یک ماده سیمانی جایگزین در بتن (Chindaprasirt, Rukzon, & Sirivivatnanon, 2008; Metha, 1977)، شده است که RHA را به عنوان یک فیلر در مخلوط قیر در نظر می‌گیرند. ارزیابی RHA به عنوان جایگزینی جزئی فیلر معمولی مورد بررسی قرار گرفت (Sargin, Saltan, 2013). Morova, Serin, & Terzi, 2013). کار تحقیقاتی دیگری برای استفاده از RHA همراه با پودر شیشه زباله و گرد و غبار آجر به عنوان فیلر در HMA برجسته شد، اما هیچ نتیجه قابل توجهی در عملکرد مخلوط RHA در مقایسه با مخلوط کنترل یافت نشد. (Arabani et al., 2016). بنابراین، یک تحقیق برای به دست آوردن درک اساسی از اثرات RHA و FA به عنوان فیلرهای جایگزین در HMA با ارزیابی طراحی مخلوط و خواص مکانیکی مخلوط قیری هدف قرار گرفته است. این مطالعه همچنین با هدف جستجوی بینشی در مورد مکانیسم اثر تقویت‌کننده فیلر در ماستیک قیری از طریق میکروسکوپ نوری است.

## ۲- مواد و مصالح

فیلرهای مذکور را نشان می‌دهد. تصاویر SEM از HL (شکل ۱ الف)، که عمدتاً از نوع دانه‌ای با بافت ناهموار و تنوع در اندازه ذرات و تمایل به آگلومره هستند. با این حال، تصاویر ذکر شده از ذرات FA (شکل ۱ ج) عمدتاً گرد و به خوبی درجه بندی شده‌اند، در حالی که شکل ۱ ب) ذرات RHA درشت تر با شکل نامنظم با ساختار بسیار متخلخل را نشان می‌دهد.

در این مطالعه از دو نوع ضایعات به عنوان فیلرهای جایگزین استفاده می‌شود: اول، RHA جمع آوری شده از یک کارخانه برنج در مازندران، شمال کشور ایران و دوم، FA از نیروگاه حرارتی. آهک هیدراته معمولی (HL) برای تهیه مخلوط‌های کنترل برای مقایسه نتایج گنجانده شده است. شکل ۱ ظاهر فیزیکی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (ASTM E986) (2010)



شکل ۱. شکل ظاهری فیلرها (شکل بالایی) و SEM (شکل پایینی) از الف) آهک هیدراته ب) خاکستر پوسته برنج ج) خاکستر بادی

شیمیایی HL مقدار بالایی از درصد 72.43% CaO به همراه 21.67% از اتلاف در احتراق (LOI) را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج آنالیز مذکور بر روی RHA و FA ارائه شده در جدول ۱، معیار مشابهی را با نوع N و F پوزولان‌ها (ASTM C618, 2003) نشان داده است، زیرا مجموع  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$  بیش از 70 درصد است. و مقادیر LOI به ترتیب 6/11 و 3/05 درصد است. اگرچه هیچ استاندارد برای درصد کربن یا LOI برای فیلر معدنی وجود ندارد، احتمالاً استفاده از خاکستر زباله با LOI

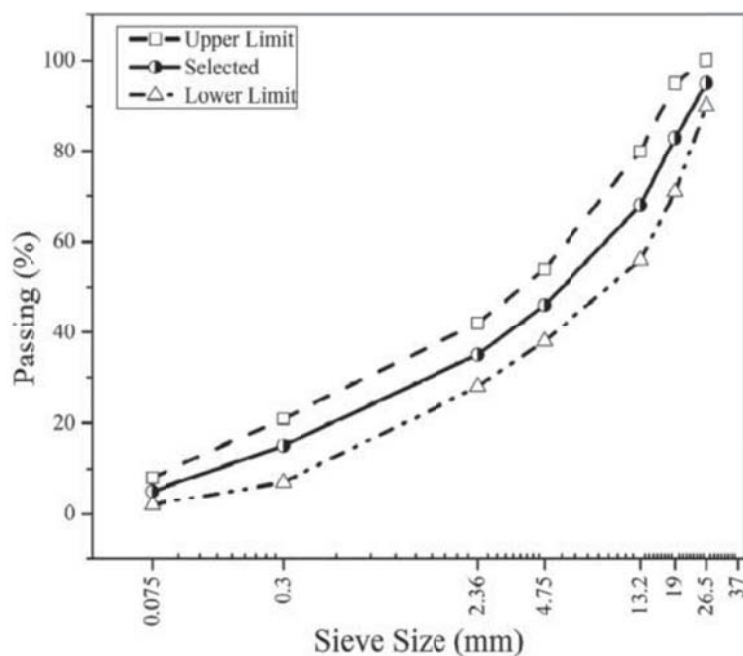
یک شکل لانه زنبوری منحصر به فرد نیز در مقطع تصاویر SEM ذرات RHA مشاهده شده است. بنابراین، فیلرهای مذکور با آزمایشی مانند (۱) وزن مخصوص (SG) با روش پیکنومتر (۲) (EN, 1097-7) سطح ویژه (SSA) با آزمایش نفوذپذیری هوا بلین (IS, 4031 Part) مشخص می‌شوند. ۲، (۱۹۹۹) و (۳) ترکیبات شیمیایی عنصری با آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (ASTM E1621) (۲۰۱۳). جدول ۱ نتایج خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف فیلرهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل

نوع سنگدانه‌های درشت و ریز سنگ بازال است که برای تهیه HMA استفاده می‌شود. یک سنگدانه درشت و ریز خرد شده با حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر برای مخلوط ماکادام قیری درجه بندی شده متراکم (DBM) انتخاب شد. درجه بندی مخلوط سنگدانه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. یک قیر VG30 به عنوان قیر استفاده می‌شود. قیر از پتروشیمی نفت پارسارگاد تهیه شده است. قیر دارای مقدار نفوذ ۵۷، ویسکوزیته سینماتیک (۱۳۵) درجه سانتیگراد (cSt) ۳۶۸، SG 1.045 و نقطه نرم شدن ۴۹ درجه سانتی‌گراد است.

نسبتاً پایین برای به حداقل رساندن جذب بالقوه قیر توسط ذرات کربنی عملی‌تر است (گزارش ۹۷۱۴۸ FHWA، 2016). نتیجه SSA و SG از HL، RHA و FA همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است نشان می‌دهد که FA دارای حداکثر مقدار SG و به دنبال آن HL و RHA است. اما مقدار SSA از RHA حداکثر مقدار را با مقدار ۵۶۵،۴ کیلوگرم بر مترمربع و به دنبال آن HL و FA به ترتیب ۴۳۱،۳ کیلوگرم بر مترمربع و ۳۰۹،۴ کیلوگرم بر مترمربع نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فیلرها

Fillers	Chemical compositions								Physical properties	
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI	SSA	SG
HL	3.24	72.45	0.41	0.33	0.46	0.13	1.22	21.67	431.1	2.15
RHA	86.67	1.88	1.62	1.06	0.97	0.43	0.12	6.11	565.6	2
FA	49.64	12.1	25.32	4.84	1.47	2.45	0.92	3.05	309.4	2.34



شکل ۲. منحنی دانه بندی مصالح سنگدانه برای آماده سازی نمونه HMA

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- طراحی مخلوط DBM

شدند (Asphalt Institute, 1993). سه نمونه یکسان برای هر سطح از درصد قیر تهیه شد. در مجموع ۲۵۴ نمونه ساخته شد و پس از محاسبه خواص حجمی مختلف، نمونه‌ها از نظر پایداری مارشال ( $MS^V$ ) و مقادیر جریان مورد آزمایش قرار گرفتند (Asphalt Institute, 1993). مقدار متغیر قیر در برابر فیلرهای مختلف با نسبت آنها برای آماده‌سازی نمونه‌های مارشال در جدول ۲ ارائه شده است. افزایش نسبت فیلر در مخلوط با کاهش سنگدانه‌های ریز برای برآوردن درجه‌بندی ترکیبی تنظیم شد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه، مخلوطی که حاوی ۲٪ HL به عنوان فیلر است، به عنوان مخلوط شاهد در نظر گرفته شد.

روش مارشال برای طراحی مخلوط DBM نسبت به نوع فیلر و نسبت مختلف برای دستیابی به درصد بهینه قیر مربوطه به کار گرفته شد. برای تهیه نمونه‌های HMA، سنگدانه‌ها در طول شب در دمای  $5 \pm 100$  درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا از شرایط بدون رطوبت اطمینان حاصل شود. سنگدانه درشت خشک، سنگدانه ریز و فیلر بر اساس درجه بندی مورد نظر وزن شده و در ظرفی با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده شد و سپس با قیر از قبل گرم شده در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اضافه شد. تمام مواد به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط شدند و نمونه‌ها سپس با اعمال ۷۵ ضربه بر روی هر سطح در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد فشرده

جدول ۲. جزییات درصد قیر متفاوت، نوع فیلر و نسبت آنها در ساخت نمونه‌های آسفالتی

Filler type	HL				RHA				FA				
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	
Filler content	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Bitumen content	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

#### ۳-۲- استحکام کششی غیر مستقیم ( $ITS^8$ ) و نسبت استحکام کششی ( $TSR^9$ )

سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خیس‌انده شدند. تمام نمونه‌ها در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد و  $ITS$  بر روی نمونه‌های خشک و مرطوب اندازه‌گیری شد. نمونه کامل از حمام خارج شد، ضخامت آن تعیین شد و سپس نوارهای بارگیری فولادی بین نمونه و صفحات برابر قرار داده شد. با استفاده از تجهیزات بارگیری مارشال، باری بر روی نمونه اعمال شد. بر اساس حداکثر بار در هنگام شکست،  $ITS$  بر حسب کیلو پاسکال از معادله ۱ محاسبه می‌شود.

مقاومت در برابر رطوبت نمونه‌های آماده شده با از دست دادن  $ITS$  پس از غوطه‌ور شدن در آب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد (ASTM D4867، 2009). در این مطالعه حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی با انجام آزمون  $TSR$  مورد ارزیابی قرار گرفت. در این آزمایش، سه نمونه بدون شرط (خشک) و سه نمونه شرطی شده (تر) برای هر گروه از مخلوط‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. در مرحله بعد، نمونه‌های مرطوب در معرض اشباع خلاء برای ۵۰ تا ۸۰ درصد اشباع آب قرار گرفتند و

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که در آن ITS مقاومت کششی غیرمستقیم، کیلوپاسکال، P اوج بار، D قطر نمونه، میلی متر و t ضخامت نمونه، میلی متر است. TSR با معادله زیر تعیین شد:

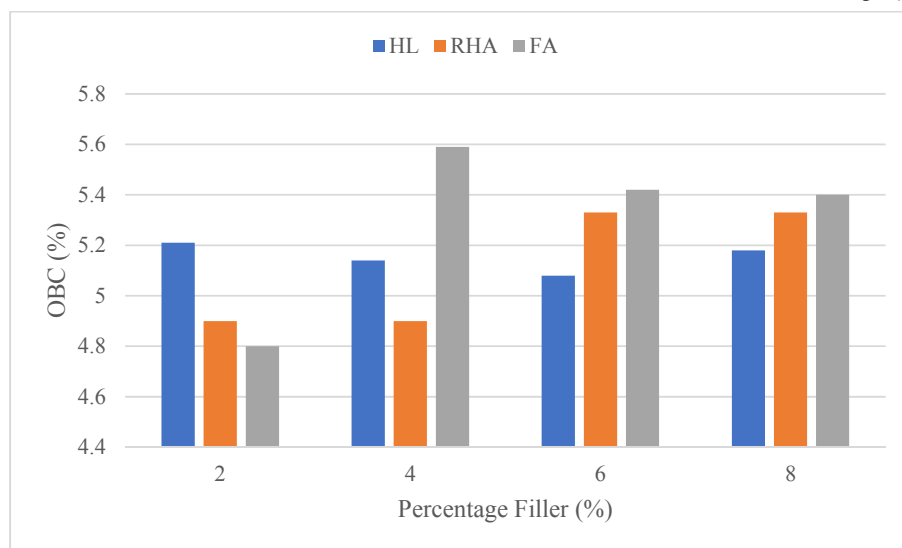
$$TSR = \frac{ITS_W}{ITS_D} \times 100 \quad (2)$$

که در آن ITS<sub>W</sub> مقاومت کششی نمونه‌های مرطوب و ITS<sub>D</sub> مقاومت کششی نمونه‌های خشک است.

### ۳-۳- تجربه و تحلیل مورفولوژیکی ماستیک توسط میکروسکوپ نوری

میکسر برش بالا در شرایط اختلاط بهینه ۲۷۵۰ دور در دقیقه در دمای ۱۶۵ درجه سانتی گراد انجام شد. قطره‌ای از ماستیک داغ بین دو اسلاید میکروسکوپ قرار داده شد و با پرچسب‌های دو سر آن جفت لام ضربه زده شد. سپس توسط میکروسکوپ نوری با قدرت بزرگنمایی ۲۰ برابر مشاهده شدند و تصویر توسط نرم افزار AxioVision 4.8 ثبت شد.

از میکروسکوپ نوری برای مقایسه اثر فیلرهای مورد مطالعه بر مورفولوژی ماستیک قیری استفاده شد، همانطور که Wang (2009) و Wang، Wu، Wang، Zhang و Karmakar (2016) در تحقیقات خود انجام دادند. ابتدا قیر را حرارت دادند تا تبدیل به سیال شود، سپس مقدار کافی فیلر اضافه شد و به مدت ۱ ساعت با قیر مخلوط شد، به طوری که ماستیک قیر با نسبت فیلر/قیر (f/b) ۰.۵- باشد. افزایش وزن به دست آمد. آماده سازی ماستیک با ۱.۴ تا ۰.۳.



شکل ۳. تغییرات درصد قیر بهینه در نمونه‌های مختلف

### ۴- نتایج و بحث

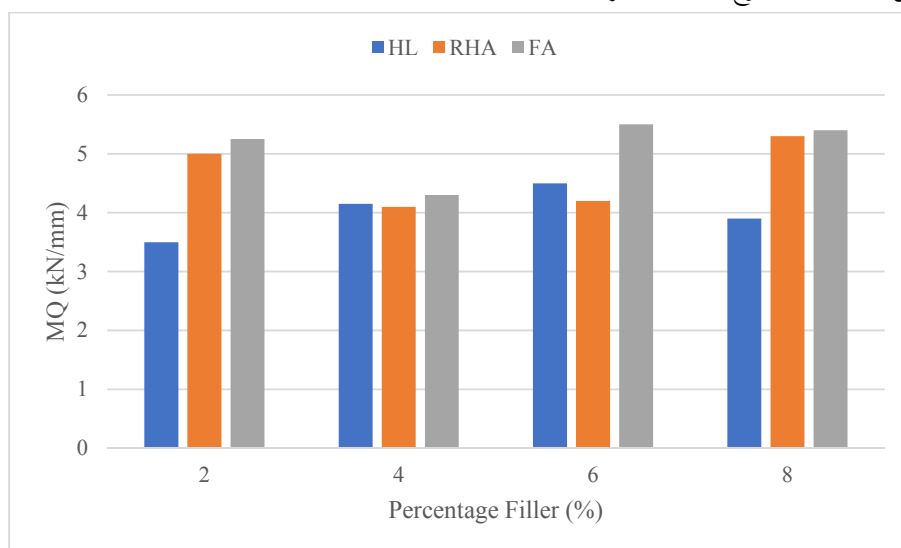
#### ۴-۱- خواص مارشال مخلوط‌های DBM

هوا برای همه مخلوط‌ها به دست می‌آید. در شکل ۳، انحراف در OBC برای افزودن نسبت متغیر برای انواع درصد فیلر نشان داد که OBC مخلوط با ۲٪ HL (مخلوط

هدف اولیه طراحی مخلوط، تعیین درصد قیر بهینه (OBC<sub>1</sub>) مخلوط‌های DBM مورد مطالعه برای درصد فیلرهای مختلف است. OBC در برابر ۴٪ فضاهای خالی

شود. روند کاهش در نتایج OBC را می‌توان به این دلیل نسبت داد که RHA به دلیل SSA بالا و ساختار متخلخل آن، تمایل به جذب چسب قیر دارد و لایه قیر روی سنگدانه‌ها را ضخیم تر می‌کند که به طور موثر فضای خالی هوای مخلوط را کاهش می‌دهد. (Arabani & Tahami, 2017). از سوی دیگر، علیرغم داشتن کمترین SSA در بین فیلرهای مورد مطالعه، FA در مقایسه با مخلوط شاهد OBC کمتری از خود نشان داد. می‌توان بیان کرد که FA، همچنین به عنوان گسترش دهنده قیر شناخته می‌شود، می‌تواند جایگزینی جزئی بایندر آسفالت را فراهم کند (Sobolev et al., 2014)، که با کاهش فضای خالی هوای HMA، OBC را کاهش داد.

شاهد) ۵,۲۱٪ است. با این حال، افزایش درصد HL (از ۲٪ به ۴٪) مقدار مذکور را به ۵,۱۸٪ کاهش می‌دهد. با این حال، در درصد ۶٪ و ۸٪ HL، همین مقدار به ترتیب به ۵,۳۳٪ و ۵,۵۹٪ افزایش یافته است. مخلوط حاوی RHA نیاز به OBC کمتری نسبت به HL نشان داد، به جز در درصد فیلر ۶٪، که در آن هر دو RHA و HL نیاز OBC یکسان به میزان ۵,۳۳٪ را نشان دادند. از سوی دیگر، FA کمترین OBC را برای تمام درصد فیلر مورد مطالعه نشان داد. با این حال، در درصد فیلر ۴٪، هر دو RHA و FA کاهش ۷,۵٪ در مقدار OBC را در مقایسه با مخلوط کنترل نشان می‌دهند. همانطور که در همه مخلوط‌ها، نوع سنگدانه، درجه بندی، نوع چسب و منابع یکسان است، بنابراین تفاوت در OBC ممکن است فقط به نوع و درصد فیلر نسبت داده



شکل ۴. نتایج نسبت مارشال نمونه‌های مختلف

با HL هیچ افزایش قابل توجهی در مقادیر MQ با افزایش درصد فیلر نشان نمی‌دهند. اما، با افزودن بیشتر به نسبت فیلر برای مخلوط‌های RHA و FA، مقادیر MQ به تدریج افزایش می‌یابد و از حداکثر حد مجاز مشخص شده ۵ MQ کیلونیوتن بر میلی‌متر فراتر می‌رود (MORT&H، ۲۰۱۳). روند افزایشی در مقادیر MQ را می‌توان به این دلیل نسبت داد ۳۲۹ هبا OBC کمتر و غلظت بالاتر فیلرهای ضایعات مذکور، جزء سبک قیر را جذب می‌کنند، ویسکوزیته و سفتی قیر بهبود می‌یابد. این امر چسبندگی بین ماستیک و سنگدانه‌ها را افزایش می‌دهد و توانایی کلی

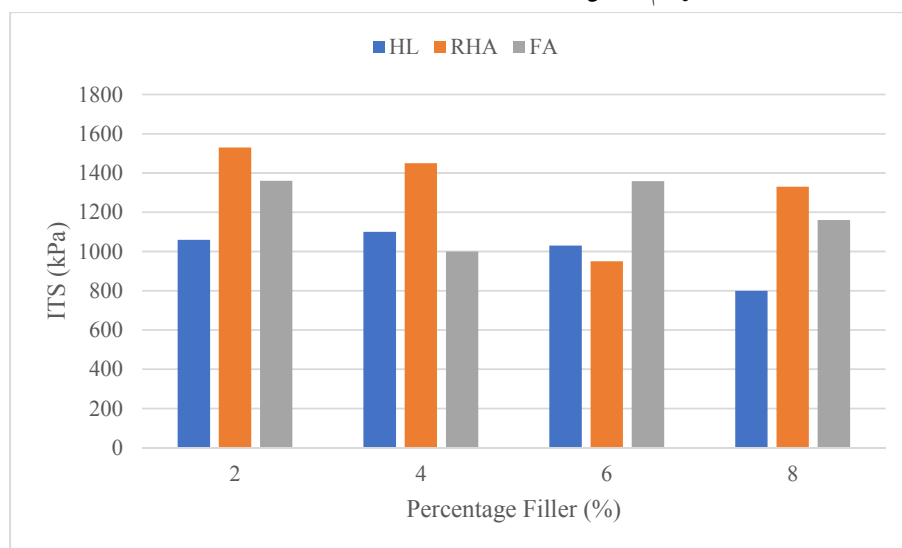
ضریب مارشال (MQ) به عنوان نسبت پایداری کیلونیوتن به جریان میلی‌متر و به عنوان نشانه ای از سفتی مخلوط تعیین می‌شود. به خوبی شناخته شده است که MQ معیاری برای سنجش مقاومت مواد در برابر تنش‌های برشی، تغییر شکل دائمی و در نتیجه شیار شدن است (Zoorob & Suparma, 2000). اثر تمام فیلرهای مذکور بر مقادیر MQ در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر MQ برای ۲٪ HL (ترکیب شاهد)، RHA و FA به ترتیب ۳,۵۳، ۴,۱۲ و ۴,۴۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر است. با این حال، در نسبت فیلر ۴٪، مخلوط RHA بالاترین مقادیر MQ را نشان می‌دهد و ۴۱٪ بیشتر از مخلوط کنترل است. مخلوط‌های ترکیب‌شده

را با مخلوط کنترل نشان می‌دهد. اما افزایش در مقادیر گفته شده برای افزودن ۴ درصد RHA و FA مشاهده می‌شود که در مقایسه با مخلوط شاهد به ترتیب برای RHA و FA نزدیک به ۴۷ درصد و ۳۷ درصد است. از نتایج ITS می‌توان به این واقعیت استدلال کرد ۳۳۰ هبا افزایش نسبت فیلر به قیر، سفتی مخلوط‌ها تا حد معینی افزایش می‌یابد که به افزایش مقادیر ITS کمک می‌کند. اما افزایش بیشتر چنین درصد فیلر جایگزین، مقادیر خواص ذکر شده را کاهش می‌دهد. این ممکن است به دلیل سفتی بالاتر مخلوط‌های اصلاح شده در افزایش نسبت فیلر باشد. از آنجایی که HMA با سختی بالا مستعد ترد شدن است و توانایی کمتری در تحمل استحکام کششی دارد.

HMA را برای تحمل بارها بهبود می‌بخشد (Hamedi & Tahami, 2017).

#### ۴-۲- تست ITS و TSR

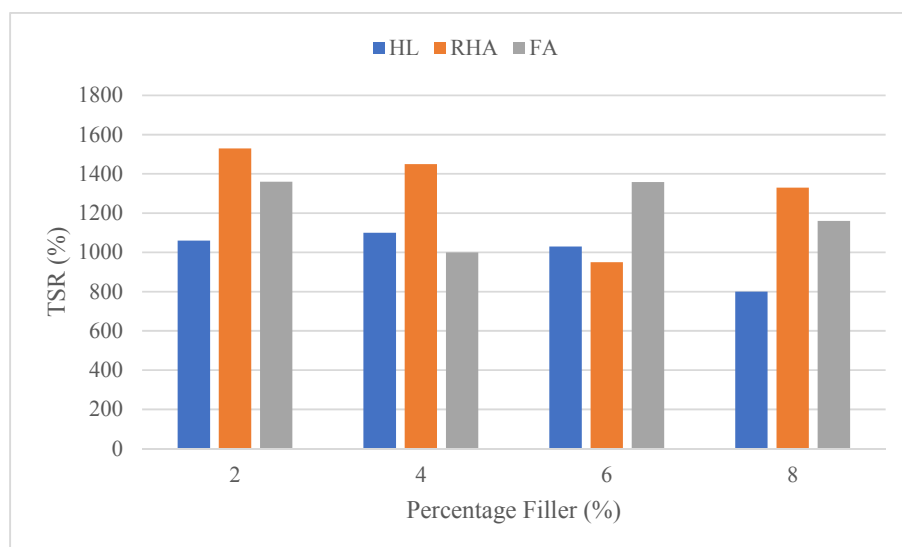
شکل ۵ نتایج ITS را با فیلرهای مختلف و درصدهای آنها نشان می‌دهد. ITS مخلوط‌ها با افزایش درصد فیلر افزایش می‌یابد و در ۴٪ RHA و FA به حداکثر مقدار می‌رسد. با این حال، افزایش بیشتر در درصد فیلر مقادیر گفته شده را بر این اساس کاهش می‌دهد، در حالی که HL در ۲٪ مقدار ITS ۱۰۶۸ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. اما افزایش مداوم درصد HL متعاقباً مقادیر ITS را کاهش می‌دهد. ITS مخلوط با RHA و FA در ۲٪ مقادیر کم و بیش مشابهی



شکل ۵. مقاومت کششی برای نمونه های مختلف مخلوط آسفالتی

علاوه بر این، نمونه‌هایی که فیلرهای جایگزین داشتند، چسبندگی خوبی در درصد فیلر ۴ درصد نشان دادند. بیشترین دلیل ممکن برای بهبود مقدار TSR این است که RHA با ذرات بسیار ریز (Della, Kuhn, & Hotza, 2002) و SSA بزرگ که توسط ساختار سلولی متخلخل آن اداره می‌شود به ذرات RHA کمک می‌کند تا به خوبی پراکنده شوند و به طور یکنواخت در HMA توزیع شوند. مخلوط‌هایی که در نهایت باعث افزایش چسبندگی بین آسفالت و سنگدانه‌ها می‌شود.

علاوه بر این، نتیجه آزمایش TSR، همانطور که در شکل ۶ ارائه شده است، اثر قابل مشاهده استفاده از فیلر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همه فیلرها حداقل مقدار TSR را مطابق با مشخصات 80% MORT&H برآورده می‌کنند (MORT&H, 2013)، به جز ۸٪ HL. همانطور که انتظار می‌رود، در درصد فیلر ۲٪ HL معمولی بالاترین نتیجه را نشان می‌دهد. اما در درصد فیلر ۴ درصد، مخلوط حاوی RHA در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نتیجه بهتری نشان می‌دهد و حدود ۲,۱۳ درصد بیشتر از مخلوط معمولی است.



شکل ۶. تاثیر فیلرهای مختلف بر نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها

## ۵- نتیجه گیری

مناسب بودن RHA و FA در HMA در این مطالعه برای دسترسی به عنوان فیلر بازیافتی جایگزین بالقوه به جای فیلر معمولی ارزیابی شد.

نتایج مطالعه تجربی نشان می‌دهد که:

-اثر فیلرهای مختلف بر OBC که به روش مارشال مورد بررسی قرار گرفت نشان داد که OBC در یک مخلوط نه تنها به نوع فیلر بستگی دارد، بلکه از نظر کمیت آنها نیز متفاوت است. OBC مخلوط‌های حاوی ۴٪ RHA و FA، ۷٫۵٪ کاهش نسبت به مخلوط شاهد نشان داد که حاکی از سود قابل توجه در هزینه تولید HMA است.

-در مقایسه با مخلوط شاهد، ITS برای ۴٪ RHA و FA به عنوان فیلر به طور قابل توجهی افزایش یافت. بنابراین وجود RHA در مخلوط باعث افزایش سفتی آنها و متعاقباً

افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک نسبت به HL معمولی می‌شود. علاوه بر این، HL در مخلوط کنترل مقاومت قابل قبولی در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت می‌دهد و می‌تواند به طور قطع به عنوان یک عامل ضد ریزش استفاده شود. با این حال، به نظر می‌رسد که RHA ریزش در درصد فیلر ۴ درصد مؤثرتر بوده و به دلیل افزایش چسبندگی بین آسفالت و سنگ‌دانه‌ها، نتیجه کمی بهتر می‌دهد. با این وجود، افزودن فیلرهای مورد مطالعه به نسبت بالاتر، تأثیر منفی بر مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌ها دارد. با در نظر گرفتن اثرات کلی RHA و FA بر خواص DBM، مواد مذکور را می‌توان به عنوان فیلر جایگزین با حفظ ۴٫۰٪ به منظور اطمینان از عملکرد بهینه مخلوط‌ها استفاده کرد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Rice Husk Ash
- 2-Fly Ash
- 3-Hydrated Lime
- 4-Hot Mix Asphalt
- 5- Dense Graded Bituminous Macadam
- 6- Scanning Electron Microscopy
- 7- Marshall Strength
- 8- Indirect Tensile Strength
- 9- Tensile Strength Ratio
- 10- Optimum Bitumen Content

۷-مراجع

- characterization”, West Conshohocken: Author.
- Carpenter, C. A., (1952), “A comparative study of fillers in asphaltic concrete”, *Public Roads*, 27(5), pp.101–110,
- Chandra, S., Kumar, P., & Feyissa, B. A., (2002), “Use of marble dust in road construction”, *Road Materials and Pavement Design*, 3(3), pp.317–330.
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S., (2011), “Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture”, *Construction and Building Materials*, 25(10), pp.3909–3914.
- Chen, M., Lin, J., Wu, S., & Liu, C., (2011), “Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture”, *Construction and Building Materials*, 25(4), pp.1532–1536.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V., (2008), “Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar”, *Construction and Building Materials*, 22(8), pp.1701–1707.
- Clopotel, C., Velasquez, R. A., & Bahia, H. U., (2012), “Measuring physico-chemical interaction in mastics using glass transition”, *Road Materials and Pavement Design*, 13(Suppl.1), pp.304–320.
- Della, V. P., Kuhn, I., & Hotza, D., (2002), “Rice husk ash as an alternate source for active silica production”, *Materials Letters*, 57(4), pp.818–821.
- Do, S. H., Mun, P. H., & Keun, R. S., (2008), “A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime”, *Waste Management*, 28(1), pp.191–199.
- EN 1097-7, (2008), “Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the particle density of filler: Pycnometer method”, Brussels: European Committee for Standardization.
- Al-sayed, M. H., Mandy, I. M., & Bauli, A. R. M., (1995), “Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions”, *Construction and Building Materials*, 9(1), pp.19–23.
- Arabani, M., & Tahami, S. A., (2017), “Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture”, *Construction and Building Materials*, 149, pp.350–358.
- Arabani, M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M., (2016), “Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials”, *Road Materials and Pavement Design*, 18, pp.713–729.  
Doi:10.1080/14680629.2016.1189349.
- Asi, I., & Assaad, A. (2005), “Effect of Jordanian oil shale fly ash on asphalt mixes”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), pp.553–559.
- Asphalt Institute, (1993), “Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types (Manual Series No. 2 (MS-2)) (6th ed.)”, Lexington, KY: Asphalt Institute.
- ASTM C618, (2003), “Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete”, West Conshohocken: Author.
- ASTM D242, (2009), “Standard specification of mineral filler for bituminous paving mixtures”, West Conshohocken: Author.
- ASTM D4867, (2009), “Standard practice for effect of moisture on asphalt concrete paving mixture”, West Conshohocken: Author.
- ASTM E1621, (2013), “Standard guide for elemental analysis by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry”, West Conshohocken: Author.
- ASTM E986, (2010), “Standard practice for scanning electron microscope beam size

- as mineral filler replacement”, *Journal of Indian Road Congress*, 76(1), pp.13–17.
- Modarres, A., & Rahamanzadeh, M., (2014), “Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt”, *Construction and Building Materials*, 66, pp.476–483.
- Read, J., & Whiteoak, D., (2003), “The shell bitumen handbook. London: Thomas Telford Publishing”.
- Roy, T. K., (2013), “Evaluation of properties of alluvial soil with addition of wastes from thermal power plant and rice mill”, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 7(3), pp.323–329.  
Doi:10.1179/1938636213Z.00000000028.
- Sargin, S., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S., (2013), “Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete”, *Construction and Building Materials*, 48, pp.390–397.
- Sobolev, K., Vivian, I. F., Saha, R., Wasiuddin, N. M., & Saltibus, N. E., (2014), “The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials”, *Fuel*, 116, pp.471–477.
- Suheibani, A. R. S., (1986), “The use of fly ash as an asphalt extender (PhD dissertation)”, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Tons, E., Goetz, R. O., & Razi, M., (1983), “Fly ash as asphalt reducer in bituminous base courses, Project Report, University of Michigan”, the Board of Water and Light. Consumer Power Co. and Detroit Edison Co. Detroit, Michigan.
- Transportation Research Board, (2011), “A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary (NCHRP Report 673, Final Report)”, Washington, DC: National Research Council.
- Tremblay, E. L., Vaillancourt, M., & Perraton, D., (2015), “Evaluation of the impact of recycled glass on asphalt mixture performances”, *Road Materials and*
- Federal Highway Administration, (2016), “User Guidelines for Waste and By Product Materials in Pavement Construction (FHWA Report 97148)”, Washington, DC.
- Fritschy, G., & Papirer, E., (1978), “Interactions between a bitumen, its components and model fillers”, *Fuel*, 57(11), pp.701–704.
- Hamedi, G. H., & Tahami, S. A., (2017), “The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*.  
Doi:10.1016/j.ijadhadh.2017.03.016 IS 4031-Part II. (1999).
- “Methods of physical tests for hydraulic cement - determination of fineness by Blaine air permeability test”, (2018), New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- Karmakar, S., & Roy, T. K., (2016), “Effect of waste plastic and waste tires ash on mechanical behavior of bitumen”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016006-1–04016006-9.
- Kim, M., & Buttlar, W., (2010), “Stiffening mechanisms of asphalt-aggregate mixtures”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2181, pp.98–108.
- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S., (2013), “A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures”, *Waste Management*, 33, pp.1906–1917.
- Metha, P. K., (1977), “Properties of blended cements made from rice husk ash”, *ACI Material Journal*, 74(9), pp.440–442.
- “Ministry of Road Transport, and Highways (MORTH)”, (2013), Specifications for road and bridge works, New Delhi: Indian Roads Congress.
- Mistry, R., & Roy, T., (2015), “Utilization of rice husk ash in hot mix asphalt concrete

-Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y., & Wang, Y., (2009), "Evaluation of the improved properties of SBR/weathered coal modified bitumen containing carbon black", *Construction and Building Materials*, 23(7), pp.2678–2687.

-Zoorob, S. E., & Suparma, L. B., (2000), "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt)", *Cement and Concrete Composites*, 22, pp.233–242. Doi:10.1016/S0958-9465(00)00026-3.

*Pavement Design*, 17, pp.600–618. Doi:10.1080/14680629.2015.1103778.

-Underwood, B. S., & Kim, Y. R., (2011), "Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete", *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), pp.357–370.

-Xiao, F., Shivaprasad, P., & Amirkhanian, S., (2012), "Low-volume road wma mixtures: Moisture susceptibility of mixtures containing coal ash and roofing shingle with moist aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), pp.48–56.

# Experimental Evaluation of Rice Husk Ash and Fly Ash as Alternative Fillers in Hot-Mix Asphalt

*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**

Ever-growing concern to protect the environment concentrated the attention of the society on the possible re-use of different agricultural and industrial wastes in road construction. This research study depicts the effect of using wastes like rice husk ash (RHA) and fly ash (FA) as a replacement of conventionally used hydrated lime (HL) as fillers in hot-mix asphalt (HMA). Primarily, the dense graded bituminous macadam (DBM) mix specimens were made in the laboratory with varying proportions ranging from 2% to 8% of HL, RHA and FA by following design mixes according to the Marshall method and compared the results with control mix as prepared by utilizing 2% HL. The performances of the said mixes were studied through the Marshall Quotient, indirect tensile strength and tensile strength ratio. Results of investigation show better performance of HMA with the addition of RHA and FA and also proved to be economical as the optimum bitumen content is reduced by 7.5% from that of control mix when added at 4% filler ratio. Further, RHA shows a greater affinity to the bitumen attributing the highest stiffening effect of the bituminous mastic droplets compared to that of other used fillers with good compatibility at the micro level by satisfying the essential criterion.

**Keywords:** Filler; Rice Husk Ash, Fly Ash, Marshall Mix Design, Tensile Strength Ratio, Optical Microscopy