

مقایسه تاثیر فیلر پسماند زغالسنگ با فیلرهای پوزولانی بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالت گرم

امیر مدرس، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
مرتضی رحمانزاده، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

با توجه به محدود بودن منابع طبیعی و توسعه ساخت و ساز راه‌ها، تقاضا برای استفاده از مصالح پسماند و بازیافتی افزایش یافته‌است. پسماند زغالسنگ یک محصول جانبی از کارخانه زغال‌شویی می‌باشد که انباشت آن مشکلات فراوان زیست محیطی و اقتصادی را ایجاد کرده است. هدف از این تحقیق مقایسه استفاده از پودر پسماند زغالسنگ و خاکستر آن به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم با سایر فیلرهای پوزولانی متداول می‌باشد. در بخش اول این تحقیق پسماند زغالسنگ به صورت کامل جایگزین فیلر معدنی رایج پودر سنگ آهک شده و با فیلرهای پوزولانی مانند سیمان و زئولیت مورد مقایسه قرار گرفت. ویژگی‌های مکانیکی مورد بررسی شامل مقاومت مارشال، نسبت مارشال، روانی، مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی می‌باشند. در بخش دوم تحقیق برای ارزیابی بیشتر علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی ذکر شده، مدول برجهنگی و خستگی پسماند زغالسنگ و خاکستر آن نیز مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها در بخش اول نشان داد، استفاده از فیلر پسماند زغالسنگ باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی ذکر شده نسبت به پودر سنگ و زئولیت شده است. همچنین در بخش دوم اگرچه خاکستر زغالسنگ نتایج بهتری نسبت به حالت خام آن داشته ولی بعلت پروسه سخت، هزینه بالا و آلودگی ناشی از سوزاندن، استفاده زغالسنگ در حالت خام به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پسماند زغالسنگ، مخلوط آسفالتی گرم، فیلر، پوزولان

۱- مقدمه

مقاومت فشاری، افزایش کند روانی قیر و کاهش شکنندگی آن می‌شود (طباطبائی، ۱۳۸۰). فیلرها از نظر درجه بندی، 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 (Muniandy, 2011). به علت کاهش منابع طبیعی، افزایش روزافزون فعالیت‌های عمرانی و راه‌سازی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جنبه‌های زیست محیطی، باعث شده تا بکارگیری از مواد ضایعاتی به مسئله مهم در سال‌های اخیر تبدیل شود. از اینرو محققان زیادی را بر آن داشته تا امکان استفاده از مواد ضایعاتی در ساخت و تهیه روسازی را مورد مطالعه قرار دهند (Yilmaz,2011, Lee,2009, Zhao,2010, Li,2008,)

سال‌ها تحقیق و پژوهش نشان می‌دهد که فیلرها به عنوان ریزدانه‌ترین بخش مخلوط آسفالتی نقش مهمی را در رفتار مخلوط آسفالتی ایفا می‌کنند. به ویژه اینکه در چسبندگی، قفل و بست بین دانه‌ها و پر کردن فضای خالی بین سنگدانه‌ها تاثیر زیادی دارند. علاوه بر این می‌توانند بر روانی، حساسیت رطوبتی، سختی، دوام، عمر خستگی، شیار شدگی و... مخلوط آسفالتی نیز تاثیرگذار باشند (Yan, Xu and Zhang,2013- Bardini, Júnior and Klinsky, 2013). یکی از مهمترین نقش‌های فیلر در مخلوط آسفالتی افزایش عمر روسازی و ازدیاد مقاومت آن در برابر نفوذ آب است. علاوه بر این، استفاده از فیلر در مخلوط آسفالتی سبب ازدیاد قدرت باربری، کاهش تغییر شکل نسبی، افزایش مقاومت در برابر ضربه، افزایش

مقاومت مکانیکی حاصل می‌شود (Santos, Filho and Pagnussat, 2012). گارسیا و همکارانش در سال ۲۰۱۲ زغالسنگ ضایعاتی را به عنوان بخشی از سیمان در مخلوط سیمانی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده به میزان ۲۰ درصد بجای سیمان مقاومت فشاری ۷ روزه را افزایش داده ولی مقاومت ۹۰ روزه را کاهش می‌دهد (García (et al), 2012). اینوتیا و همکارانش در سال ۲۰۰۹ پسماند زغالسنگ را در تثبیت اساس و زیر اساس مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل نشان از افزایش مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه داشت (Laskowski, 2001).

هدف از این مطالعه مقایسه تاثیر فیلر CWP با خاکستر آن و فیلرهای پوزولانی سیمان (CP^2) و ژئولیت (ZP^3) بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالت گرم می‌باشد. در این تحقیق فیلرهای مصرفی ۷ درصد وزنی کل مصالح سنگی را شامل می‌شوند. فیلرهای مورد بررسی به طور کامل جایگزین فیلر مرجع پودر سنگ (LS^4) شده‌اند. برای این منظور در این مطالعه پس از تهیه پسماند زغالسنگ از کارخانه البرز مرکزی مازندران آن‌ها را تبدیل به پودر کرده و مقادیر عبوری از الک ۲۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. سپس در بخش اول این مطالعه ویژگی‌های مکانیکی چون مقاومت مارشال، روانی، نسبت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم و حساسیت رطوبتی مخلوط حاوی CWP با فیلرهای پوزولانی CP و ZP مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در بخش دوم این مطالعه بعد از سوزاندن پسماند زغالسنگ و تبدیل آن به خاکستر (CWA^5)، برای مقایسه و ارزیابی بیشتر علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی ذکر شده، مدول برجهنگی و عمر خستگی نمونه‌های حاوی CWP با CWA نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲-پروژه فرآوری زغالسنگ

فرآوری زغالسنگ شامل فرایندهای فیزیکی است که با مرتب کردن، دانه‌بندی و کاهش مواد معدنی موجود، مانند خاکستر و گوگرد، موجب بهبود کیفیت آن می‌شود.

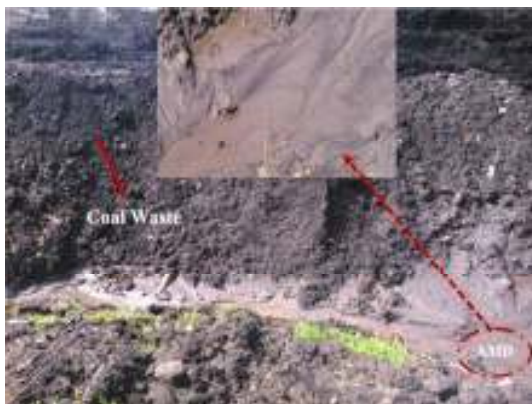
در تحقیقات اخیر استفاده از آهک پسماند بازیافتی، فیلر به دست آمده از پسماند فسفات، خاکستر زباله‌های شهری جامد سوزانده شده، مواد سرامیکی ضایعاتی، گرد کوره سیمان، خاکستر پوسته برنج و سنگ آهک بازیافتی به عنوان فیلر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل از آن رضایت بخش توصیف شده است (Katamine, 2006, Xue, 2009, Huang, 2009, Sargin, 2013, Hwang, 2008, Thanaya, 2006, Taha, 2002). به طور کلی مواد زائد را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد، (الف) زباله های صنعتی از قبیل ضایعات سلولز، لیگنین چوب، خاکستر بادی و خاکستر سیمان (ب) زباله‌های شهری داخلی مانند پسماند زباله سوز، لاستیک ضایعاتی، ضایعات شیشه و ایزوگام و (ج) باطله‌های استخراج شده از معادن مانند زغالسنگ ضایعاتی.

زغالسنگ یکی از فراوان‌ترین منابع تولید انرژی در جهان می‌باشد. زغالسنگ تولیدی در جهان حدود ۵/۵ میلیارد تن در سال بوده و حجم تولیدی آن در کشور ایران به ۳۱۰ میلیون تن در سال می‌رسد. پس از بهره‌وری از زغالسنگ در مصارف گوناگون حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از آن‌ها به صورت باطله دفن یا دپو می‌شوند. پودر زغالسنگ ضایعاتی (CWP^1) با داشتن خاصیت پوزولانی و با دارا بودن سیلیس و آلومینا می‌تواند خواصی مشابه پوزولان نوع F داشته و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شود. همچنین استفاده از آنها از نظر هزینه نیز بسیار ناچیز می‌باشد. از طرف دیگر دپوی این ضایعات مشکلات فراوانی برای محیط زیست و منطقه ایجاد نموده است (Inuthia and Nidzam, 2009).

قبلاً پسماند زغالسنگ در روسازی بتن بلوکی، تولید سیمان، تثبیت خاک، تهیه مصالح ساختمانی، و در مخلوط‌های سیمانی استفاده شده است. کاسیانو و همکارانش در سال ۲۰۱۲ پسماند زغالسنگ را بعنوان ریزدانه در روسازی بتن بلوکی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۲۵ تا ۵۰ درصد زغالسنگ ضایعاتی بجای ریزدانه، نتایج رضایت بخشی از نظر

۳- اثرات زیست محیطی پسماند زغالسنگ

یکی از مسائل مهم ایجاد شده ناشی از دپو پسماند زغالسنگ مشکل جدی زیست محیطی می باشد. مشکل آلودگی در معادن زغالسنگ به طور کلی ناشی از اکسیداسیون پیریت می باشد. هنگامی که که پیریت و مواد حاوی آهن در معرض آب یا هوا و یا هردوی آن قرار می گیرند، دستخوش اکسیداسیون سریع خواهند شد که منجر به تولید آب های اسیدی می شود. آلودگی ناشی از آب های اسیدی معدنی (AMD) به عنوان مهمترین آلاینده آب در اطراف معادن به شمار می آید، که شامل سولفات آهن و مواد دیگری است که می تواند منابع آب را آلوده کنند (Canovas, 2007). AMD به عنوان یکی از آلاینده های اصلی آب شناخته می شود. این زهاب ها با PH کم شامل مقادیر زیاد آهن، SO_4^{2-} و مقادیر متغیری از فلزات سمی می باشد (Lee JS, Chon, 2007). در شکل ۱ نمونه ای از پساب های ناشی از زغالسنگ ضایعاتی مشاهده می شود.



شکل ۱. آب های اسیدی تولید شده از پسماند زغالسنگ

از جمله مشکلاتی دیگری که دامپ های پسماند زغالسنگ ایجاد می کنند می توان به از بین بردن پوشش های گیاهی منطقه، تخریب مناظر و ایجاد گرد و غبار به هنگام وزش شدید باد در منطقه اشاره کرد. در شکل ۲ بخشی از دپو پسماند زغالسنگ البرز مرکزی نشان داده شده است. همچنین با افزایش استخراج زغال سنگ در این منطقه به

مهمترین واحدهای این عملیات شامل سرندها، تمیز کردن، خرد کردن و جداسازی می باشد. روش پر عیار کردن ثقلی به وسیله تجهیزات موسوم به جیگ برای زغال ها با اندازه متوسط و درشت و فلوتاسیون برای زغال های ریز انجام می گیرد (Shahhoseiny et al, 2013). پسماند زغالسنگ استفاده شده در این مطالعه از کارخانه زغالشویی البرز مرکزی مازندران واقع در شمال کشور ایران، شهر زیراب تهیه شده است. البرز مرکزی مازندران یکی از قدیمی ترین و معروف ترین معادن تولید زغالسنگ در ایران با ذخایر احتمالی ۵۵۷ میلیون تن می باشد.

زغالسنگ خام از معادن مختلف شامل کارمزد، انجیر تنگه، پل سفید و جنوب زیراب، به منظور انجام عملیات فرآوری وارد سکوی پذیرش کارخانه زغالشویی می شوند. زغالسنگ های خام معادن با هم مخلوط شده و پس از خرد شدن توسط دستگاه های مخصوص، سرندها شده و به دو گروه تقسیم می شوند. گروه اول شامل زغال های با اندازه بزرگتر از ۸۰ میلیمتر می باشد که پس از انجام عملیات سنگجوری به کنستانتره زغال تبدیل می شوند. گروه دوم شامل زغال های با اندازه کوچکتر از ۸۰ میلیمتر توسط نوار نقاله های موجود وارد سرندها بعدی شده و خود به دو دسته تقسیم می شوند. زغال های با اندازه ۰/۵ تا ۸۰ میلیمتر وارد تجهیزات جیگ شده و طی عملیات فرآوری ثقلی قسمتی از آن به کنستانتره و قسمت دیگر آن به ضایعات تبدیل می شوند. دسته دوم زغال های کوچکتر از ۰/۵ میلیمتر می باشند که طی انجام عملیات فلوتاسیون بخشی به کنستانتره و بخش دیگر به ضایعات تبدیل می شوند. در این مطالعه از ضایعاتی که توسط روش فرآوری ثقلی (جیگ ماشین) به دست آمده، استفاده شده است. ۴۰ تا ۴۵ درصد از زغالسنگ های ورودی به کارخانه به ضایعات تبدیل شده که در محوطه اطراف کارخانه با مساحت حدود ۲ هکتار دپو می شود. از سال ۱۹۸۸ تاکنون حدود ۱/۵ میلیون تن از این ضایعات انباشت شده و بسته به تولید کارخانه روزانه معمولاً ۲۵۰ تن به این مقدار اضافه می شود. (ادبی، اصانو و مهدی رحمان پور، ۱۳۹۱).



شکل ۲. بخشی از دپو پسماند زغالسنگ البرز مرکزی مازندران

منظور تامین انرژی کارخانه‌های ذوب آهن، حجم باطله‌های زغالسنگ در اطراف معادن و کارخانه‌های زغال‌شویی افزایش یافته است. به نظر می‌رسد یکی از راه‌های رهایی از معضل دپوی این مواد استفاده از آن‌ها در صنعت ساخت و ساز به ویژه راهسازی می‌باشد (ادبی و همکاران، ۱۳۹۱).

۴- مصالح

مصالح مورد استفاده در مخلوط آسفالتی گرم شامل سه بخش مصالح سنگدانه‌ای ریز و درشت دانه، قیر و فیلر بوده است. در این مطالعه از ۵ فیلر مختلف استفاده شده است. با انجام آزمایشاتی ویژگی‌های مصالح سنگدانه‌ای، قیر و فیلرهای مصرفی تعیین شده که در ادامه مشخصات آن‌ها بیان شده است.

۴-۱- سنگدانه

در تهیه مخلوط‌ها از سنگدانه شکسته شده و تیز گوشه معدن فیروزکوه استفاده شد. دانه‌بندی مورد استفاده، یک دانه‌بندی پیوسته با حداکثر اندازه اسمی ۲۵ میلیمتر بوده است. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D3515 انجام شده و نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارایه شده است. همچنین در این جدول حد بالا و پایین دانه‌بندی مطابق دانه‌بندی شماره ۳ آیین نامه مشاهده می‌شود. سایر مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ ارایه گردیده است.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

اندازه الک (میلیمتر)	حد بالا و پایین دانه بندی (میلیمتر)	درصد رد شده (میلیمتر)
۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰-۹۰	۹۵
۹/۵	۸۰-۵۶	۷۵
۴/۷۵	۶۵-۳۵	۶۰
۲/۳۶	۴۹-۲۳	۴۱
۰/۳	۱۹-۵	۱۱
۰/۰۷۵	۸-۲	۷

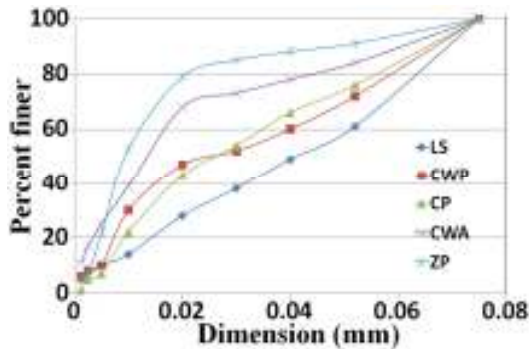
جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
سایش لس آنجلس	ASTM-D131	%	۱۵/۶۵
مقاومت فشاری	ASTM-D692	kg/cm ²	۲۸۰۰
وزن مخصوص	ASTM-C127	gr/cm ³	۲/۶۳
مقاومت ضربه‌ای	ASTM-D5821	%	۲۳
جذب رطوبت	ASTM-C127	%	۱/۰۱

۴-۲- قیر

قیر مصرفی در این تحقیق شامل قیر خالص ۱۰۰-۸۵

افزایش یافته و سطح تماسی بزرگتری با قیر حاصل می‌شود که حاصل آن پراکنش همگن ذرات فیلر در قیر و جذب سطحی بالاتر خواهد بود. فیلرهای ریزدانه‌تر به دلیل کوچک بودن ابعاد ذرات، سطح جانبی بزرگتر و سطح تماس بیشتری با قیر داشته که حاصل آن فعل و انفعالات شیمیایی بیشتر با قیر است.



شکل ۳. دانه‌بندی فیلرهای مصرفی در این تحقیق

۴-۳-۱- CWP

پسماند زغالسنگ استفاده شده در این مطالعه از روش جیگ تهیه شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی ارائه در جدول ۵ CWP با داشتن خاصیت پوزولانی می‌تواند خواصی مشابه پوزولان نوع F داشته باشد (ASTM: C 618, 1982). همچنین بعد از انجام آزمایش حد روانی مشخص شد که CWP مورد استفاده خاصیت خمیری نداشته است. پسماند زغالسنگ مورد استفاده در این مطالعه پس از خشک شدن کامل، پودر شده و مقادیر عبوری از الک ۲۰۰ آن مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۵ ترکیب شیمیایی این ماده نشان داده شده است.

۴-۳-۲- CWA

اثرات مخرب کربن نسوخته به خصوص در سیمان مورد استفاده در مخلوطهای بتنی یکی از ویژگی‌های مورد توجه محققان بوده است. اگرچه اثرات مخرب این ماده در بتن اثبات نشده است اما به دلیل اینکه این ماده خاصیت سیمانی ندارد تنها به عنوان یک فیلر غیر فعال عمل خواهد

تولید پالایشگاه تهران بوده است. مشخصات قیر طبق دستورالعمل ASTM-D1856 تعیین شده و در جدول ۳ ارایه داده شده است.

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
نقطه نرمی	ASTM D36	°C	۴۸
درجه نفوذ	ASTM D5	۰/۱mm	۹۱/۷۲
درجه اشتعال	ASTM D92	°C	۳۱۰
کشسانی	ASTM D11	cm	>۱۰۰
وزن مخصوص	ASTM D70	gr/cm ³	۰/۹۹۸

۴-۳-۴- فیلر

در این مطالعه از ۴ فیلر مختلف با خاصیت پوزولانی برای مقایسه با فیلر CWP استفاده شد. برای تمامی فیلرها آزمایش تعیین وزن مخصوص به وسیله پیکنومتر با استفاده از استاندارد ASTM: D854 انجام گرفته شد. وزن مخصوص تمامی فیلرهای مصرفی در این مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. وزن مخصوص فیلرهای مصرفی

فیلر	CWA	CWP	LS	ZP	CP
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۲/۶۴	۲/۱۲	۲/۶۴	۱/۹	۳/۱۵

برای تعیین دانه‌بندی فیلرهای مصرفی در این مطالعه از آزمایش هیدرومتری استفاده شده است. آزمایش هیدرومتری بر پایه اصول ته‌نشینی دانه‌ها و بر اساس استاندارد ASTM: D422 انجام گرفت (ASTM: D 422, 2002) و نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود فیلر LS بزرگترین اندازه و فیلر ZP کوچکترین اندازه را بین فیلرها داشته است. ذرات ریزتر ضریب سطح بزرگتری دارند که بیانگر سهم بزرگتر آنان در سطح جانبی است. با کوچک شدن ابعاد، اندازه و دانه بندی ذرات فیلر، سطح ویژه آنها

شیمیایی و کانی شناسی آن دارد. مساحت سطح بالای آن مبنای واکنش پذیری زیاد آن می‌باشد. خواص پوزولانی زئولیت به علت وجود Al_2O_3 و SiO_2 در ترکیب شیمیایی آن می‌باشد (Chan, 1999). به طور کلی بیش از ۴۰ نوع کانی زئولیت طبیعی کشف و بیش از یکصد و پنجاه نوع زئولیت مصنوعی ساخته شده است. زئولیت‌های موجود در ایران از نوع رسوبی می‌باشند. زئولیت استفاده شده در این مطالعه از نوع طبیعی و از معدن آبگرم سمنان تهیه شده است. زئولیت مورد استفاده در کارخانه سنگ زئولیت، آسیاب و به اندازه کمتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر تبدیل شد. در جدول ۴ ترکیب شیمیایی ZP مصرفی در این تحقیق نشان داده شده است.

LS-۳-۵-۴

سنگ آهک، سنگی رسوبی با منشأ شیمیایی یا زیست شیمیایی که بیشتر از کلسیم‌کربنات تشکیل شده، یکی از متداول‌ترین فیلرهای معدنی در ساخت بتن آسفالتی می‌باشد. این ماده اغلب به عنوان یک پرکننده در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Anderson, Goetz, 1973). پودر سنگ آهک مصرفی در این تحقیق به عنوان فیلر مرجع در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی CWP, CWA, ZP, CP و LS توسط آزمایش پراش اشعه ایکس (XRF^8) طبق استاندارد ASTM C 618 انجام شده و ترکیبات شیمیایی شناسایی شده مطابق جدول ۵ می‌باشد.

۵- آزمایش‌ها و طرح اختلاط

۱-۵- ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق از روش مارشال برای تهیه نمونه‌ها طبق آیین نامه ASTM-D1559 استفاده شده است. در این روش هر نمونه استوانه‌ای دارای قطر ۱۰/۶ و ارتفاع ۶۳/۵ می‌باشد. ۱۸ نمونه با درصدهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد وزنی قیر (به ازاء هر درصد سه نمونه) طبق استاندارد ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های

کرد (Neville, 1993). به منظور کاهش درصد کربن نسوخته و افزایش نسبت ترکیبات پوزولانی در این تحقیق پسماند زغالسنگ سوزانده شد. برای تعیین دمای سوزاندن زغالسنگ ضایعاتی به منظور کاهش مقدار کربن آن، از آزمایش ASTM D7348 - 13 مربوط به آنالیز نمونه خاکستر زغالسنگ و کک استفاده شد. CWP در ۴ دمای ۴۵۰، ۷۵۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ ساعت در کوره‌های مخصوص سوزانده و سپس برای هر ۴ دما مقدار افت ناشی از حرارت (LOI^7) اندازه گرفته شد. طبیعتاً با افزایش حرارت، خاکستر تولیدی مقدار LOI کمتری دارد. ولی از آنجا که تغییرات LOI در دمای بالای ۷۵۰ درجه خیلی محسوس نبوده و از نظر زیست محیطی هم باعث آلودگی می‌شود، دمای ۷۵۰ درجه به عنوان دمای سوزاندن CWP تعیین گردید. همانطور که در جدول ۵ ترکیب شیمیایی CWA نشان داده شده است مقدار کربن نسوخته از ۴۰/۹۶ درصد به ۲/۰۱ درصد کاهش یافت.

CP-۳-۳-۴

امروزه از سیمان پرتلند به عنوان فیلر در تهیه مخلوط‌های آسفالتی به صورت فراوان استفاده می‌شود. سیمان پرتلند به عنوان یک فیلر فعال باعث افزایش چسبندگی قیر و سنگ شده و عملکرد مخلوط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سیمان استفاده شده در این مطالعه از نوع سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکا می‌باشد. در جدول ۴ ترکیب شیمیایی CP نشان داده شده است.

ZP-۴-۳-۴

زئولیت از دسته کانی‌های رسی است که همچون کانی‌های رسی از پایه هیدروسیلیکات‌های آلومینیم همراه با برخی کاتیونها و اکسیدهای فلزات و قلیایی خاکی تشکیل شده‌اند. ساختمان کریستالی آن بر پایه یک شبکه سه بعدی از تتراسیلیکات‌های چهار وجهی که تمام اکسیژن‌های آنها با چهار وجهی‌های مجاور مشترک می‌باشند، قرار دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که زئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. فعالیت پوزولانی زئولیت بستگی به ترکیب

اعمال بار تا زمان شکستن نمونه می‌باشد. در این آزمایش همچنین مقدار روانی طبق دستورالعمل ASTM-D1559 برای تمام نمونه‌های ساخته شده تعیین گردید. یکی از پارامترهای که از طریق آن می‌توان نشانه سختی مخلوط آسفالتی را تعیین نمود، نسبت استقامت مارشال به روانی که نسبت مارشال (MQ^9) نامیده می‌شود، می‌باشد. MQ می‌توان معیاری برای تعیین مقاومت مخلوط در برابر تنش برشی، تغییر شکل دائمی و شیارشدگی باشد (Roberts et al, 1996). مخلوطی که دارای MQ بالاتری باشد مخلوط سختتری بوده، از اینرو می‌تواند مقاومت بالاتری در برابر تغییر شکل‌های دائمی داشته باشد (Setiadji, 2005).

۳-۵- کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS^{10}) برای تعیین خصوصیات کششی بتن آسفالتی که مرتبط با خصوصیات ترک خوردگی روسازی است، استفاده می‌شود (Modarres, 2011). برای اندازه‌گیری مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های ذکر شده با قیر بهینه ساخته شده و نتایج به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ASHTTO-T283 تحت آزمایش ITS قرار گرفت. با قرائت نیروی وارده P از دستگاه و با استفاده از رابطه (۱) مقاومت کششی تعیین می‌گردد (AASHTO T283, 1995):

$$ITS = \frac{2000P_{max}}{\pi t d} \quad (1)$$

در این رابطه P_{max} : بار نهایی اعمال شده (نیوتن) t: ارتفاع نمونه (میلیمتر) D: قطر نمونه (میلیمتر) S_t : مقاومت کششی (کیلوپاسکال) می‌باشد.

۴-۵- مدول برجهدگی

مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی که طبق استاندارد ASTM D4123 به روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود، یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین

استقامت مارشال، روانی، وزن مخصوص حقیقی و حداکثر برای تعیین قیر بهینه انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده قیر بهینه برای تمامی فیلرها تعیین گردید. فیلر ZP دارای قیر بهینه ۵/۴، CP ۵/۱، CWP ۵/۲، LS ۵/۲ و CWA ۵ درصد انتخاب گردید. همچنین فیلر مصرفی ۷ درصد وزن کل سنگدانه را شامل شده و تمامی فیلرها به صورت ۱۰۰ درصد جایگزین LS شده است. برای انجام آزمایش مقاومت مارشال، روانی، کشش غیر مستقیم، مدول برجهدگی، خستگی و حساسیت رطوبتی سه نمونه در حالت خشک و سه نمونه در حالت اشباع بازای هر یک از پنج فیلر ساخته شد.

جدول ۵. درصد ترکیب شیمیایی CWP، CWA، LS، ZP، CP و

LP مورد استفاده در تحقیق

عنوان	CWP	CWA	LS	ZP	CP
Sio ₂	۳۴/۸۰	۵۵/۶۳	۱۷/۹۵	۶۷/۴۴	۲۱/۹
Al ₂ O ₃	۱۴/۵۳	۲۳/۲۵	۰/۴۶	۱۰/۹۰	۵/۸۶
Fe ₂ O ₃	۳/۸۹	۸/۰۹	۰/۰۵	۰/۸۴	۳/۳۰
MgO	۰/۸۷	۱/۵۴	۳/۶۴	۰/۳۳	۱/۱۵
CaO	۰/۵۱	۲/۲۸	۴۶/۹۰	۱/۲۴	۶۳/۳۲
Na ₂ O	۰/۲۷	۰/۵۹	۰/۰۸	۳/۷۱	۰/۳۶
k ₂ O	۲/۳۹	۳/۹۶	۰/۱۰	۴/۳۹	۰/۵۶
TiO ₂	۰/۹۸	۱/۶۳	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۲۷
L.O.I	۴۰/۹۶	۲/۰۱	۲۹/۹۵	۱۱/۰۵	۲/۴۰

۲-۵- استقامت مارشال

یکی از پارامترهای اساسی در طراحی مخلوط‌های بتن آسفالتی استقامت مارشال می‌باشد. در این تحقیق استقامت مارشال CWP با فیلرهای CP، ZP، LS و CWA در حالت خشک و اشباع مورد مقایسه قرار گرفت. بعد از تهیه نمونه‌ها در حالت خشک نمونه‌ها باید به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۶۰ درجه قرار گرفته و بعد مورد آزمایش قرار بگیرند. ولی در حالت اشباع بعد از ساخت، نمونه‌ها را باید ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه قرار داد و سپس آزمایش استقامت مارشال انجام گیرد. روانی مارشال شامل تغییر شکل عمودی نمونه‌های تحت آزمایش از ابتدای

۵-۵- خستگی

خستگی یکی از خرابی‌های مهم و قابل توجه در روسازی بوده که در اثر تکرار بارگذاری به وجود می‌آید. این روش بارگذاری مشابه آزمایش مدول برجهنگی می‌باشد و اعمال بار تا شکست کامل نمونه ادامه دارد. نمودار تغییر شکل قائم نمونه تحت بارگذاری در شکل ۴ نشان داده شده است. در تست خستگی کششی غیر مستقیم تعریف‌های مختلفی برای عمر شکست نمونه‌ها ارائه شده است در شکل ۴ دو تعریف برای عمر شکست نمونه‌ها ارائه شده است. بر طبق EN-12697-24، عمر شکست برابر کل سیکل بارگذاری که منجر به شکست کامل می‌شود، می‌باشد (EN 12697-24, 2004). مطابق شکل ۴ الف، طبق تعریف مجانب تغییر شکل به صورت قائم می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ ب نشان داده شده است، طبق این تعریف معیار عمر خستگی زمانی در نظر گرفته می‌شود که نرخ ثابت افزایش تغییرشکل‌های افقی مطابق شکل تسریع می‌گردد (Hiago, Kim, Lee, 2008). پس از این مرحله، ترکی‌های تار مویی و ریز در نمونه بهم متصل شده باعث شکست نمونه می‌شوند.

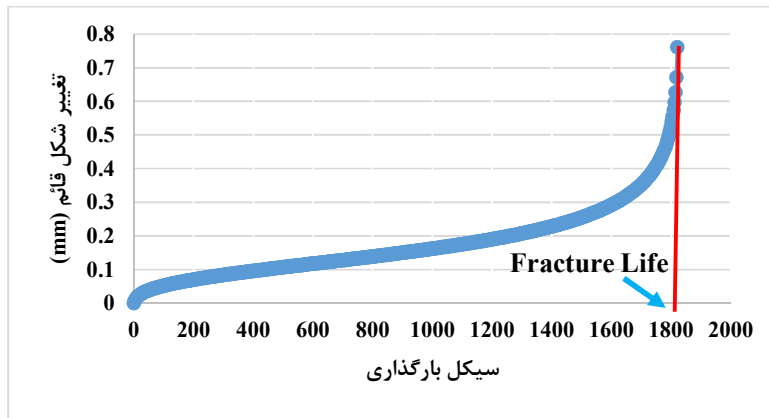
در این تحقیق بار اعمالی در آزمایش خستگی ۳۰ درصد تنش کششی غیر مستقیم می‌باشد. دما توسط محفظه دمایی کنترل شده و آزمایش در دمای ۲۰°C صورت پذیرفت. زمان سیکل بارگذاری ۱/۵ ثانیه، مدت زمان بارگذاری ۰/۲۵ ثانیه و مدت زمان استراحت ۱/۲۵ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین خستگی نمونه به صورت گسیختگی نمونه و تغییر شکل قطری ۹ میلی‌متر تعریف شده است. برای انجام آزمایش از دستگاه تست UTM استفاده شده و بارگذاری تا شکست کامل نمونه ادامه دارد.

نمودار تنش- کرنش جهت ارزیابی خصوصیات الاستیک مصالح است (Tayfur, Ozen and Aksoy, 2007). اکثر مصالح مورد استفاده در روسازی راه‌ها دارای خاصیت الاستیک نیستند و در اثر اعمال بار دچار تغییر شکل‌های ماندگار می‌شوند. اما در صورتی که بار اعمالی در مقایسه با مقاومت ماده کوچک بوده و به صورت مکرر اعمال شود، تغییر شکل ایجاد شده در هر سیکل بارگذاری تقریباً به طور کامل برگشت‌پذیر بوده و در این شرایط می‌توان ماده را الاستیک فرض کرد (Kavussi, Modarres, 2011). برای یک بار دینامیکی با حداکثر اندازه P که تغییرشکل‌های افقی ناشی از آن اندازه‌گیری شده‌اند، مدول برجهنگی کل با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید (ASTM D4123-82, 2003):

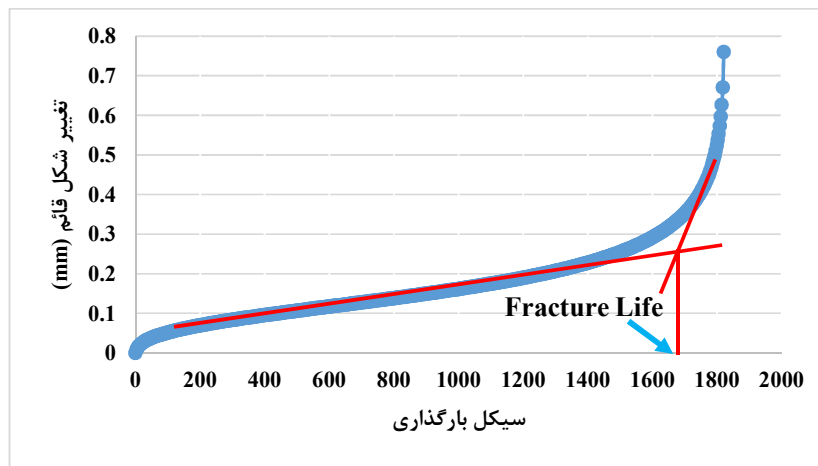
$$M_r = \frac{P(\mu + 0.27)}{t\delta_h} \quad (2)$$

در این رابطه M_r : مدول برجهنگی (MPa)، P : حداکثر بار دینامیکی (N)، μ : ضریب پواسن (۰/۳۵)، t : طول نمونه (میلی‌متر).

δ_h : تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر کل (میلی‌متر) می‌باشند. آزمایش مدول برجهنگی با استفاده از دستگاه -UTM¹¹ 14P انجام شد. آزمایش در دمای ۲۰°C انجام گرفت. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، فرکانس بارگذاری یک هرتز، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه در نظر گرفته شد. تعداد پیش بارگذاری ۱۰۰ سیکل بوده و آزمایش برای هر نمونه در یک سطح تنش (۲۰ درصد مقاومت کششی در شرایط دمایی و عمر مشابه) انجام شد. ضریب پواسن ۰/۳۵ فرض گردید. همچنین تغییرشکل افقی توسط دو LVDT ثبت می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴. تعریف عمر شکست در آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم

۵-۶- حساسیت رطوبتی

نمونه بدون تاثیر رطوبت (ITS_d) و ۳ نمونه برای حالت اشباع (ITS_s) با میزان ۷ درصد فضای خالی در نظر گرفته شده است. در حالت خشک نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری می‌شوند. نمونه‌های مرطوب داخل دستگاه خلاء به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه تحت فشار ۶۷ کیلوپاسکال قرار گرفته و پس از گذراندن زمان ۵ تا ۱۰ دقیقه در حمام آب ۲۵ درجه قرار می‌گیرند. پس از آن، نمونه‌ها توسط سلفون پوشانده شده و در یک کیسه پلاستیکی به همراه ۱۰ میلی لیتر آب درون فریز با دمای 3 ± -18 درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شود. سپس نمونه‌ها در یک دوره ۲۴ ساعته درون حمام آب ۶۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند. در پایان نمونه

برای ارزیابی حساسیت رطوبتی به روش مارشال (MSR^{12}) نسبت مارشال اشباع به خشک محاسبه گردید. برای تعیین MSR ، نسبت متوسط مقاومت سه نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته (M_s) به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در داخل آب ۶۰ درجه قرار گرفته (M_d) محاسبه شد. باید توجه داشت که مقدار به دست آمده نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد. این روند برای تمام نمونه‌ها طبق استاندارد صورت گرفته و حساسیت رطوبتی تمام نمونه‌ها طبق رابطه (۲) تعیین شد. برای تعیین حساسیت رطوبتی از طریق مقاومت کششی (TSR^{13}) طبق استاندارد ASHTTO-T283 از هر درصد ۳

همچنین در جدول ۶ مقدار روانی مخلوط‌های حاوی فیلرهای مختلف نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی CP و ZP کمترین مقدار روانی را دارا می‌باشند که بیانگر تغییر شکل کمتر و اصطکاک داخلی بیشتر ذرات تشکیل دهنده آنها است. بیشترین مقدار روانی مربوط به نمونه حاوی فیلر LS می‌باشد. نمونه حاوی فیلر CWP نیز مقدار روانی آن در محدوده تعیین شده استاندارد ASTM-D1559 بوده و نسبت به فیلر LS مقدار روانی کمتری دارد. با توجه به جدول ۶، نمونه‌های حاوی CP و CWP بیشترین مقدار MQ در بین دیگر فیلرها دارا می‌باشند. بیشتر بودن مقدار پارامتر MQ نشان دهنده بالا بودن مقاومت در برابر تنش برشی و تغییر شکل دائمی و شیار شدگی مخلوط آسفالتی می‌باشد. همچنین بالا بودن مقدار MQ نشان دهنده سختی بالای مخلوط، توانایی بیشتر در برابر توزیع بار بار اعمالی و مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل‌های خزشی می‌باشد (Muniandy, 2011). بالا بودن مقدار استقامت مارشال و MQ حاکی از پتانسیل بالا برای تحمل ترافیک سنگین و مقاومت بالاتر در برابر شیار شدگی مخصوصا در دمای بالا می‌باشد (Yilmaz, 2011 et al). کمترین مقدار MQ مربوط به نمونه حاوی فیلر LS می‌باشد.

جدول ۶. نتایج آزمایش مارشال

نوع مخلوط / پارامتر	LS	ZP	CP	CWP
استقامت مارشال (KN)	۸/۷۵	۹/۰۰	۱۲/۶۴	۱۰/۲۰
روانی (mm)	۳/۱۳	۲/۸	۲/۵	۳
MQ (KN/mm)	۲/۸۰	۳/۸۷	۵/۰۶	۴/۲۰

در شکل ۵ نمودار تاثیر فیلرهای مورد مطالعه را بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد. محدوده مقاومت کششی فیلرها بین ۷۲۰ تا ۸۲۰ کیلوپاسکال می‌باشند. بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به مخلوط حاوی فیلر CP و کمترین مقدار مربوط

اشباع ۲ ساعت درون حمام آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس مقاومت کششی آن از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. TSR به دست آمده از رابطه (۴) برای شرایط فوق نباید کمتر از ۸۰ درصد باشد.

$$MSR = \frac{M_s}{M_d} \times 100 \quad (3)$$

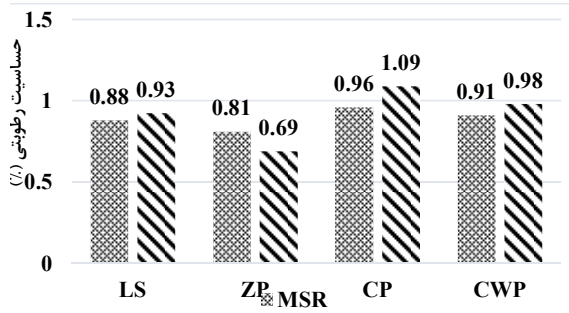
در رابطه (۳) M_d استقامت مارشال در شرایط خشک بر حسب کیلو نیوتن، M_s استقامت مارشال در شرایط مرطوب بر حسب کیلو نیوتن و MSR نسبت استقامت مارشال اشباع به خشک می‌باشد

$$TSR = \frac{ITS_s}{ITS_d} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه (۴) ITS_d و ITS_s به ترتیب مقاومت کششی غیر مستقیم خشک و اشباع بر حسب کیلو پاسکال و TSR نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک می‌باشد.

۶- بحث

در جدول ۶ نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال برای فیلرهای مورد مطالعه نشان داده شده است. مطابق شکل محدوده استقامت مارشال بین ۸/۷۵ تا ۱۲/۶۴ کیلو نیوتن بوده و برای تمام نمونه‌ها از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه برای ترافیک سنگین (۸ KN) بیشتر می‌باشد (ASTM: D 1559, 1998). همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، بیشترین استقامت مارشال مربوط به نمونه‌های حاوی CP و CWP می‌باشد. فیلر CWP دارای خاصیت پوزولانی بیشتری نسبت به CP می‌باشد ولی CP به علت داشتن خاصیت آهکی بالاتر نسبت به این فیلرها دارای استقامت مارشال بیشتری می‌باشد. در واقع ترکیبات پوزولانی سیلیس و آلومینا موجود در CP در حضور آب وارد واکنش شده و سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینیم کلسیم هیدراته را تولید می‌نماید. وجود این ترکیبات سیمانی می‌تواند عاملی برای افزایش مقاومت در مجاورت آب نسبت به حالت خشک باشد (Niazi, Jalili, 2009)



شکل ۶. مقایسه پارامترهای حساسیت رطوبتی نمونه‌های حاوی فیلهای مورد مطالعه در این تحقیق

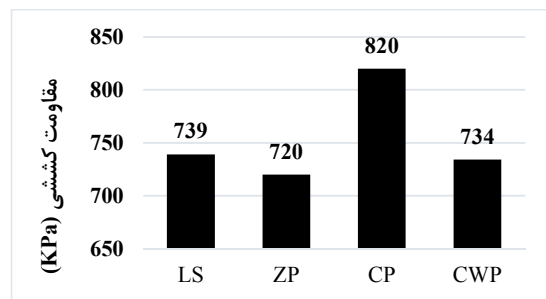
در جدول ۷ نتایج استقامت مارشال نمونه CWP با خاکستر آن و LS ارایه گردید. نتایج نشان می‌دهد بعد از سوزاندن پسماند زغالسنگ مقاومت مارشال، روانی و نسبت مارشال بهبود پیدا کرده‌اند. مطابق جدول ۵ بعد از سوزاندن پسماند زغالسنگ ترکیبات پوزولانی آن افزایش پیدا کرده است. بهبود استقامت مارشال و روانی که حاصل آن بهبود MQ می‌باشد باعث افزایش سختی، مقاومت در برابر تنش برشی، تغییر شکل دائمی و شیار شدگی مخلوط آسفالتی حاوی CWA نسبت به CWP شده است. البته ویژگی‌های مارشال پسماند زغالسنگ و خاکستر آن نسبت به فیله مرجع برتری قابل توجهی دارد.

جدول ۷. نتایج آزمایش مارشال CWP با خاکستر آن و فیله مرجع

مشخصات	LS	CWP	CWA
استقامت مارشال (KN)	۸/۷۵	۱۰/۲۰	۱۲/۶۰
روانی (mm)	۳/۱۳	۳	۲/۵
MQ (KN/mm)	۲/۸۰	۴/۲۰	۵/۰۴
MSR	۹۸	۹۶	۹۸

در شکل ۷ نتایج حاصل از آزمایش کشش غیر مستقیم در شرایط خشک، اشباع و TSR نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد مقاومت کششی CWA در حالت خشک و اشباع بیشتر از CWP می‌باشد. همچنین TSR نمونه CWA از حالت خام آن بیشتر بوده که نشان دهنده مقاومت بالاتر آن در برابر رطوبت است. از عوامل

به مخلوط حاوی ZP می‌باشد. مقاومت کششی نمونه CWP کمی کمتر نسبت LS بوده ولی تفاوت زیادی نسبت به CP داشته که یکی از علت‌های این امر وجود ترکیبات پوزولانی و آهکی در کنار هم در مخلوط حاوی CP می‌باشد. به طور کلی از علت‌های افزایش میزان مقاومت کششی نمونه‌های CP و LS نسبت به نمونه CWP بالا بودن میزان درصد آهک و اینکه مصالحی چون پودر سنگ آهک جزو مصالحی بازی بوده و واکنش‌های شدید و موثری در سطح تماس قیر- سنگدانه ایجاد می‌کند که موجب افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه می‌گردند.



شکل ۵. مقایسه مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی فیلهای مورد استفاده در این تحقیق

در شکل ۶ تغییرات MSR و TSR مخلوط‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. MSR تمامی نمونه‌های مورد آزمایش بیشتر از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه (۷۵ درصد) می‌باشد. مطابق شکل ۶ نمونه CP بیشترین مقدار MSR را بین نمونه‌ها داشته است. می‌توان یکی از عوامل بالا بودن دوام مخلوط‌های حاوی CP نسبت به CWP را با توجه به جدول ۵ وجود ترکیبات پوزولانی و آهکی در کنار هم در ترکیب سیمان دانست. در واقع اکسید سیلیسیوم و اکسید آلومینیم با آهک در مجاورت آب واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینیم کلسیم هیدراته تولید می‌کنند که باعث افزایش چسبندگی می‌باشد (Kavussi, Moghadas Nejad and Modarres, 2011). با توجه به شکل ۶، TSR به دست آمده از تمامی نمونه‌ها بجز ZP بیشتر از حداقل مقدار تعیین شده در آیین‌نامه (۸۰ درصد) می‌باشند. همچنین کمترین مقدار MSR و TSR در بین نمونه‌ها مربوط به نمونه ZP است.

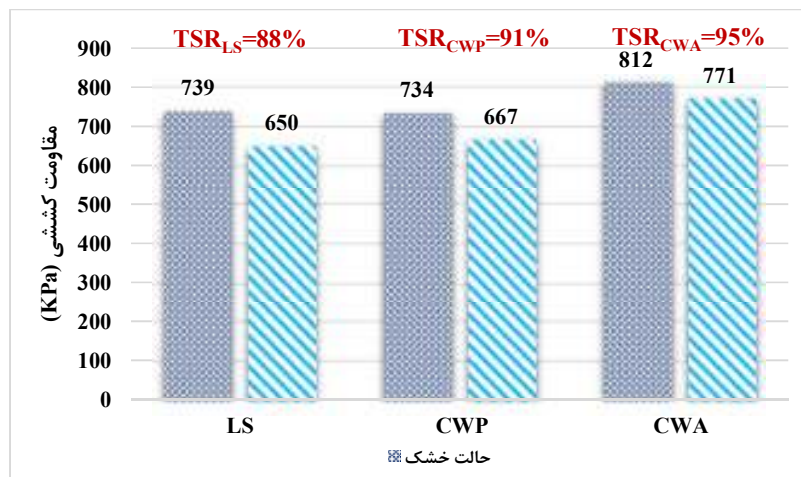
افزایش میزان TSR قبل و بعد از سوزانده شدن زغالسنگ می‌توان به افزایش خاصیت پوزولانی و آهکی و کاهش ۳۹ درصدی شاخص LOI خاکستر آن بعد سوزانده شدن اشاره کرد.

در شکل ۸ مقایسه مدول برجهندگی فیلهای CWP، CWA و LS نشان داده شده است. ترکیبات پوزولانی باعث بهبود چسبندگی بین سنگدانه و قیر می‌شوند. همچنین این مواد می‌توانند باعث پیوستگی داخلی بیشتر فاز قیری شده در نتیجه باعث افزایش مقاومت شود. با توجه به شکل ۸ مشخص است بیشترین مدول برجهندگی مربوط به نمونه CWA و CWP می‌باشد.

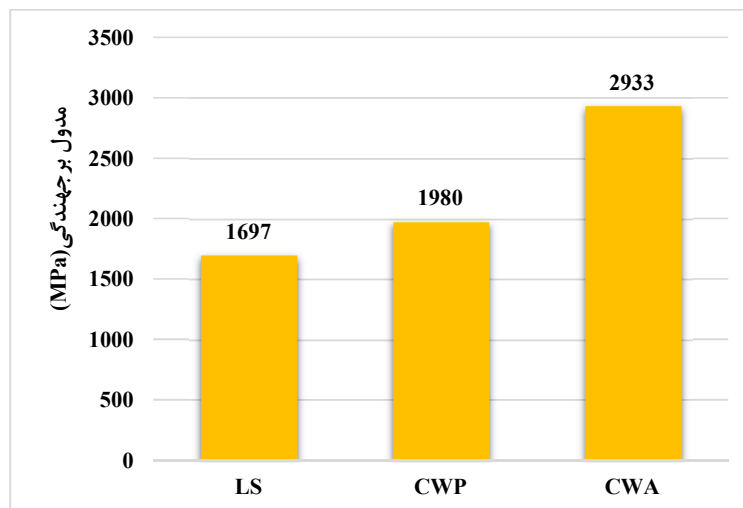
در شکل ۸ مقایسه مدول برجهندگی فیلهای CWP، CWA و LS نشان داده شده است. ترکیبات پوزولانی باعث بهبود چسبندگی بین سنگدانه و قیر می‌شوند. همچنین این مواد می‌توانند باعث پیوستگی داخلی بیشتر فاز قیری شده در نتیجه باعث افزایش مقاومت شود. با توجه به شکل ۸ مشخص است بیشترین مدول برجهندگی مربوط به نمونه CWA و CWP می‌باشد.

در شکل ۹ تغییرات عمر خستگی فیلهای CWP، CWA و LS نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده، نمونه حاوی CWA دارای بیشترین مقاومت در برابر خستگی می‌باشد. فیلهای CWP نیز عمر خستگی بیشتری نسبت به فیلهای LS داشته است.

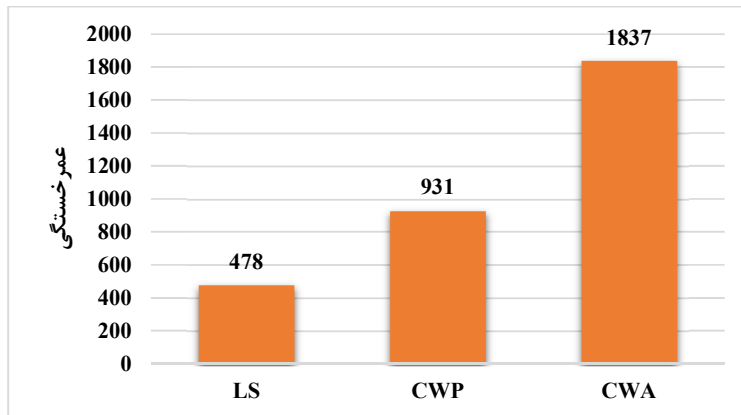
در شکل ۹ تغییرات عمر خستگی فیلهای CWP، CWA و LS نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده، نمونه حاوی CWA دارای بیشترین مقاومت در برابر خستگی می‌باشد. فیلهای CWP نیز عمر خستگی بیشتری نسبت به فیلهای LS داشته است.



شکل ۷. مقایسه مقاومت کششی CWP با خاکستر آن و فیلهای مرجع



شکل ۸. مقایسه مدول برجهندگی CWP با خاکستر آن و فیلهای مرجع



شکل ۹. مقایسه عمر خستگی CWP با خاکستر آن و LS

می‌توان به عنوان جایگزین فیلر معدنی در مخلوط‌های آسفالت گرم پیشنهاد گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های حاوی فیلر پسماند زغالسنگ با فیلرهای دیگر مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در بخش اول مخلوط‌های حاوی پودر پسماند زغالسنگ با فیلر مرجع سنگ آهک و فیلرهای پوزولانی سیمان و زئولیت و در بخش دوم با خاکستر آن با انجام آزمایش‌های مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. براساس تحلیل‌های آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر قابل توجه است:

۱- در بین فیلرها به ترتیب نمونه‌های حاوی CP و CWP بهترین نتایج آزمایش مارشال (مقاومت مارشال، روانی و نسبت مارشال) را داشته است. بالا بودن مقاومت و نسبت مارشال نشان دهنده سختی بالا نمونه‌ها و مقاومت بالای نمونه در برابر شیار شدگی و تغییر شکل ماندگار می‌باشد. این نتایج نشان دهنده می‌توان از CWP در مناطق آب و هوایی گرم با ترافیک سنگین استفاده نمود. فیلر LS نیز بدترین نتایج را در بین نمونه‌ها داشته ولی حداقل مقدار تعیین شده در استاندارد را رعایت نموده است.

۲- مقاومت کششی CWP با ۷۳۴ کیلو پاسکال نسبت به CP مقاومت کمتری داشته و تقریباً مشابه LS عمل

بر اساس نتایج به دست آمده نمونه حاوی CWP اگرچه بهترین نتایج را در بین فیلرهای مورد مطالعه نداشته ولی نتایج قابل قبولی مخصوصاً در برابر فیلر مرجع و ZP داشته و حداقل معیارهای تعیین شده در استانداردها برآورد نموده است. باید به این نکته توجه داشت یکی از مشکلات موجود در این ماده بالا بودن درصد کربن نسوخته یا LOI بوده که در صورت خمیری بودن ماده می‌تواند باعث مشکلاتی در دوام گردد. اما همانطور که در متن مقاله ذکر شد بر اساس آزمایش انجام شده بر روی پسماند زغالسنگ این ماده خاصیت خمیری نداشته است. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق حاکی از آن است که در تمامی نمونه‌های مورد مقایسه، فیلر زغالسنگ در حالت طبیعی نه تنها دوام کمتری نداشته بلکه در مقایسه با LS و ZP مقاومت بالاتری در برابر رطوبت داشته است. همچنین خاکستر این ماده به دلیل حذف بخش زیادی از کربن و به تبع آن کاهش مقدار LOI و افزایش نسبت ترکیبات پوزولانی در یک وزن ثابت از افزودنی نتایج بهتری در خصوصیات مقاومتی داشته است. به هر حال نتایج آزمایش‌های دوام برای زغالسنگ طبیعی و خاکستر آن تفاوت قابل توجهی ندارد. اما با توجه به هزینه بالا پروسه تبدیل پسماند زغالسنگ به خاکستر و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آن، و همچنین نتایج قابل قبول تست‌های CWP در برابر فیلرهای دیگر، هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ زیست محیطی استفاده از CWP در حالت خام را

پوزولانی بالا که باعث افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه شده دانست. همچنین CWP با ۱۹۸۰ مگاپاسکال نتیجه بهتری نسبت به فیلر مرجع داشته است.

۷- نتایج حاصل از تست خستگی نشان می‌دهد نمونه حاوی فیلر CWA دارای عمر خستگی ۱۸۳۷ بیشترین مقاومت در برابر تکرار بارگذاری در بین فیلهای مورد آزمایش داشته است. بالاتر بودن عمر خستگی CWP نسبت به فیلر مرجع نشان دهنده مقاومت مخلوط حاوی این فیلر در برابر تکرار بارگذاری و تغییر شکل‌ها می‌باشد.

۸- باید توجه داشت فیلهای مورد مقایسه در این مطالعه با CWP دارای پروسه تهیه سخت و هزینه بالای داشته می‌باشند. ولی CWP یک فیلر ضایعاتی بوده که با هزینه بسیار پایین و براحتی در دسترس می‌باشد. توجه به این نکته ضروریست، سوزاندن زغالسنگ به دلیل کاهش درصد کربن نسوخته و افزایش خاصیت پوزولانی دارای عملکرد بهتری نسبت به حالت خام آن می‌باشد، ولی بعلاوه افزایش هزینه و مشکلات زیست محیطی که از سوزاندن آن حاصل می‌شود، استفاده از خاکستر آن توصیه نمی‌شود. به عنوان یک جمع‌بندی کلی با توجه به نتایج رضایت‌بخشی به دست آمده از آزمایش‌ها، استفاده از پسماند زغالسنگ در حالت خام علاوه بر صرفه جویی اقتصادی و حفظ محیط زیست می‌تواند به عنوان فیلر جایگزین در مخلوط‌های آسفالتی گرم به ویژه در مناطق گرمسیر با ترافیک سنگین توصیه شود.

۸- پی‌نوشت

- 1- Coal waste powder
- 2- Cement powder
- 3- Zeolite powder
- 4- Lime stone
- 5- Caol waste ash
- 6- Acid mine drainage
- 7- Loss on Ignition
- 8- X-Ray diffraction
- 11- Marshall Quotient
- 12- Indirect tensile strength
- 13- Marshal stability ratio

کرده است. بالا بودن مقاومت کششی نمونه حاوی CP با توجه به ترکیب شیمیایی آن بعلاوه خاصیت پوزولانی و آهکی بالا باعث افزایش چسبندگی و در نتیجه افزایش مقاومت کششی شده است. کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه حاوی فیلر ZP با ۷۲۰ کیلوپاسکال بوده است.

۳- نمونه‌های حاوی فیلر CWP در حساسیت رطوبتی نتایج رضایت‌بخشی داشته است. MSR نمونه‌های حاوی فیلر CWP با ۰/۹۱ درصد و TSR آن با ۰/۹۸ نشان دهنده مقاومت بالای نمونه‌های حاوی CWP در برابر رطوبت می‌باشد. البته فیلر CP با داشتن خاصیت پوزولانی و آهکی در کنار هم بهترین نتیجه را در بین فیلهای داشته است. تمامی فیلهای بجز فیلر ZP حداقل معیار تعیین شده در آیین نامه را رعایت کرده اند.

در بخش دوم این مطالعه فیلر CWP بعد از سوزاندن در دمای ۷۵۰ درجه تبدیل شدن آن به خاکستر گردید. برای مقایسه بیشتر تر مخلوط‌های حاوی CWP، CWA و LS باهم مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

۴- نتایج آزمایش مارشال نشان دهنده آن بود که CWA با استقامت ۱۲/۶۰ کیلونیوتن، روانی ۲/۵ میلی‌متر و نسبت مارشال ۵/۰۴ نتایج بهتری نسبت به حالت خام آن یعنی CWP داشته است. زیرا بعد از سوزاندن زغالسنگ ضایعاتی مقدار درصد کربن نسوخته آن کاهش پیدا کرده و خاصیت پوزولانی آن افزایش یافته است. ولی هر دو فیلر CWP و CWA نتایج بهتری نسبت به فیلر مرجع داشته‌اند.

۵- نتایج مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع و همچنین نسبت آن‌ها که نشان دهنده مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌باشد حاکی از آن است CWA نتایج بهتری نسبت به CWP داشته است.

۶- نتایج حاصل از مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی CWP، CWA و LS نشان می‌دهد، CWA با ۲۹۳۳ مگاپاسکال بهترین نتیجه را داشته که علت آنرا خاصیت

-García, R., Frías, M., Sanchez de Rojas, M. I., Juan Valdés, A. and Medina, C. (2012). "Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement". Cement Concrete Comp. 34. Pp.678-683.

- Hiago F, Kim YR, Lee J. (2008), "Research on fatigue of asphalt mixtures and pavements in Nebraska". Report No. P579, University of Nebraska Lincoln.

-Huang, B. S., Dong, Q. and Burdette, E. G. (2009). "Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete". Constr. Build. Mater. pp.3451-3456.

-Hwang, S. D., Park, H. M. and Rhee, S. K. (2008). "A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime". Waste Manage. 28(1): 191-200.

-Inuthia, J. M. and Nidzam, R. M. (2009). "Effect of Slag and Siliceous Additions on the Performance of Stabilized Coal Waste Backfill". World of Coal Ash Conference (WOCA), Lexington, Kentucky.

- Katamine, N. M. (2006). "Phosphate waste in mixtures to improve their deformation". J. Trans. Eng. 126: pp.382-391.

- Kavussi .A, Moghadas .F Nejad, Modarres .A, (2011), " Laboratory fatigue models for recycled mixes with pozzolanic cement and bitumen emulsion ", Journal of Civil Engineering and Management, 17(1), pp. 98-107.

- Kavussi .A, Modarres .A, (2010). "A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results". Construction and Building Materials 24, pp. 2252-2259.

- Laskowski, J. S. 2001. "Coal Flotation and Fine Coal Utilization". Department of Mining and Mineral Process Engineering.

- Lee JS, Chon HT (2006), "Hydro geochemical characteristics of acid mine drainage in the vicinity of an abandoned mine", Daduk Creek, Korea. J Geochem Explore 88, pp.37-40.

- Lee ST. (2009), "Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack". Waste Manage; 29(8), pp.2385-91.

- Li, X. P. (2008). "Recycling and reuse of waste concrete in China, Part I: Material behavior of recycled aggregate concrete". Resour. Conserv. Recy. 53(1): pp.36-44.

- Masashi .K, Takeshi .K, Youichi .S. (2000) "MSW fly ash stabilized with coal ash for geotechnical application". J Hazard Mater; 76:

14- Tensile strength ratio

۸- مراجع

- طباطبائی، الف. م.، (۱۳۸۰). کتاب روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

- ادیبی، ن.، اصانلو، م.، رحمان پور، م.، (۱۳۹۱)، "بررسی اثرات زیست محیطی دامپ‌های باطله معادن زغال‌سنگ کارمزد"، اولین کنگره ملی زغال‌سنگ.

-AASHTO T283. (1995), "Resistance of compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage". AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials, Part II, Washington, D.C.

-ASTM: C 618, (1982), "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", ASTM Book of Standards, USA.

-ASTM: D 422 – 63, (2002), "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", ASTM Book of Standards, USA.

-ASTM: D 1559, (1998), "Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus", ASTM Book of Standards, USA.

-ASTM D4123-82, (2003) "Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures", ASTM Book of Standards, Vol. 04.03, USA.

-Anderson, D. A. and Goetz, W. H. (1973). "Mechanical Behavior and Reinforcement of Mineral Filler-asphalt Mixtures" Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 42, pp. 37-66.

-Bardini .V, Júnior .J, Klinsky .L, (2013), " Influence of mineral filler on Volumetric properties of hot mix asphalt ", International Journal of Pavements Conference.

-Canovas CR, Olias M, Nieto JM, Sarmiento AM, Ceron JC (2007), "Hydro geochemical characteristics of the Tinto and Odiel Rivers (SW Spain)". Factors controlling metal contents. Sci Total Environ 373: pp.363-382.

-Chan, X. Ji. (1999), Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes: Cement and Concrete Composites, pp.293-300.

-EN 12697-24. (2004), "Bituminous mixtures-test methods for hot mix asphalt - part 24: resistance to fatigue. European committee for standardization".

- Setiadji B.H, (2005), "Use of waste materials for pavement construction in Indonesia", Journal of the Institution of Engineer, Singapore, Vol. 45, Issue2.
- Shahhoseiny .M, Doulati .F, Ardejani, Shafaei .S.Z, Noaparast .M, Hamidi .D, (2013), "Geochemical and Mineralogical Characterization of a Pyritic Waste Pile at the Anjir Tangeh Coal Washing Plant, Zirab, Northern Iran", Mine Water Environ 32, pp.84-96.
- Taha R, Al-Rawas A, A Al-Harthy A. and A Qatan A, (2002), " Use of Cement Bypass Dust as Filler in Asphalt Concrete Mixtures", ASCE:0899-1561, pp.338-343.
- Tayfur S, Ozen H, Aksoy A. (2007), "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers". Construct Build Mater; 21: pp.321-8.
- Thanaya, I.N.A., J. P. Forth, (2006), "Utilisation of Coal Ashes in Hot and Cold Bituminous Mixtures", International Coal Ash Technology Conference.
- Xue, Y. J., Hou, H. B., Zhu, S. J. and Zha, J. (2009). "Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact". Constr. Build 23. pp.989-996.
- Yan .K. Xu .H, Zhang .H. (2013). "Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing sasobit". Constr. Build. Mater. 48. pp.622-627.
- Yilmaz, M. Baha Vural K k, Necati Kulođlu, (2011). "Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt". Constr. Build. Mater. 25. pp.4279-4286.
- Zhao, W., Leefinkb, R. B. and Rotterc, V. S. (2010). "Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China: The case of Chongqing". Resour. Conserv. Recy. 54(6). pp. 377-389
- pp.265-283.
- Modarres .A, F Moghadas Nejad Kavussi .A, Hassani .A, Shabanzadeh .E, (2011), " A parametric study on the laboratory fatigue characteristics of recycled mixes", Construction and Building Materials 25, pp. 2085-2093.
- Muniandy, E. A. (2011), "The effect of type and particle size of industrial wastes filler on indirect tensile stiffness". Aust. J. Basic Appl. Sci. 5(11): pp.297-308.
- Neville, A. M., (1993), "Properties of Concrete", Longman Scientific and Technical, Singapore
- Niazi, Y. & Jalili Q. M. (2009). "Effect of Portland Cement and Lime Additives on Properties of Cold In-Place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion", Construction and Building Materials 23, pp. 1338-1343.
- Prithvi S. Kandhal, (1992), "Waste Materials in hot mix asphalt - an overview, National Center for Asphalt Technology", Auburn University, Alabama.
- Roberts FL, Kandhal PS, Brown ER, Lee DY, Kennedy TW (1996), "Hot mix asphalt materials, mixture design", and construction, 2nd ed., National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, Lanham, Maryland.
- Santos, C., Filho .J, Pagnussat .D, (2012). "Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Blocks for Paving". 10th International Conference on Concrete Block Paving, Shanghai, Peoples Republic of China.
- Sargin, S., Saltan, M. and Morova, N. (2013). "Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete". Constr. Build. Mater. 48. pp. 390-397.
- Sargin, S., Morova, N., Saltan, M. and Sung, D. H., Hee, M. P. and Suk, K. R. (2008). "A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime". Waste Manage. 28. pp. 191-200.

Comparing the Effects of Coal Waste Filler and Pozzolanic Fillers on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

A. Modarres, Associate Prof., Road and Transportation Eng, Babol Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran.

M. Rahmanzadeh, M.Sc. of Road and Transportation Engineering, Babol Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran.

E-mail: a.modarres@nit.ac.ir

ABSTRACT

Due to the limitation of natural resources and road construction developments, the demand for using waste and recycled materials has significantly increased. Coal waste is a by-product of the coal washing plant and its accumulation leads to different environmental and economic complications. The main objective of the current paper is to compare using coal waste powder and ash as filler in hot mix asphalt with other usual pozzolanic fillers. In the first section of this study coal waste completely replaces the usual fillers with lime stone powder and is compared with the pozzolanic fillers such as cement and zeolite. Mechanical properties studied here include Marshall Stability, Marshall Quotient, flow, tensile strength and moisture sensitivity. In the second section in order to better explore the subject, besides the above-mentioned mechanical properties, the resilient modulus and the fatigue of samples containing coal waste and ash are reanalyzed. The test results from the first section show that using coal waste filler improves the mentioned mechanical properties compared to lime stone powder and zeolite. Moreover, in the second section while coal ash has a better result compared to the raw state but due to difficult procedure, high cost and the pollution resulted from burning, using raw coal waste as filler in hot mix asphalt is recommended.

Keywords: Coal waste, Hot mix Asphalt, Filler, Pozzolan