

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

امیر مدرس\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

مرتضی رحمانزاده، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

\* a.modarres@nit.ac.ir

## 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 بعنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم با سایر فیلرهای پوزولانی متداول می‌باشد. در بخش اول این تحقیق پسماند زغالسنگ بصورت 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 برجهندگی 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 بعنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم توصیه می‌شود.

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

## 1-مقدمه

سال‌ها تحقیق و پژوهش نشان می‌دهد که فیلرها بعنوان 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 فشاری، افزایش کند روانی قیر و کاهش شکنندگی آن می‌شود [طباطبائی، 1380]. 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, Masashi,2000, Sargin,2008]. 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 بعنوان 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 [Prithvi,1992].

زغالسنگ یکی از فراوان ترین منابع تولید انرژی در جهان می‌باشد. زغالسنگ تولیدی در جهان حدود 5/5 میلیارد تن در سال بوده و حجم تولیدی آن در کشور ایران به 310 میلیون تن در سال می‌رسد. پس از بهره‌وری از زغالسنگ در مصارف گوناگون حدود 50 تا 60 درصد از آن‌ها بصورت 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].

قبلا 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 2012 پسماند زغالسنگ را بعنوان ریزدانه در روسازی بتن بلوکی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که با جایگزینی 25 تا 50 درصد زغالسنگ ضایعاتی بجای ریزدانه، نتایج رضایت بخشی از نظر مقاومت مکانیکی حاصل می‌شود [Santos, Filho and Pagnussat,2012]. گارسپا و همکارانش در سال 2012 زغالسنگ ضایعاتی را بعنوان بخشی از سیمان در مخلوط سیمانی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده به میزان 20 درصد بجای سیمان مقاومت فشاری 7 روزه را افزایش داده ولی مقاومت 90 روزه را کاهش می‌دهد [García (et al), 2012]. اینوتیا و همکارانش در سال 2009 پسماند زغالسنگ را در تثبیت اساس و زیر اساس مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصله نشان از افزایش مقاومت فشاری 7، 28 و 90 روزه داشت [Laskowski,2001].

هدف از این مطالعه مقایسه تاثیر فیلر  $CWP$  با خاکستر آن و فیلرهای پوزولانی سیمان ( $CP^2$ ) و زئولیت ( $ZP^3$ ) بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالت گرم می‌باشد. در این تحقیق فیلرهای مصرفی 7 درصد وزنی کل مصالح سنگی را شامل می‌شوند. فیلرهای مورد بررسی بطور 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 200 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

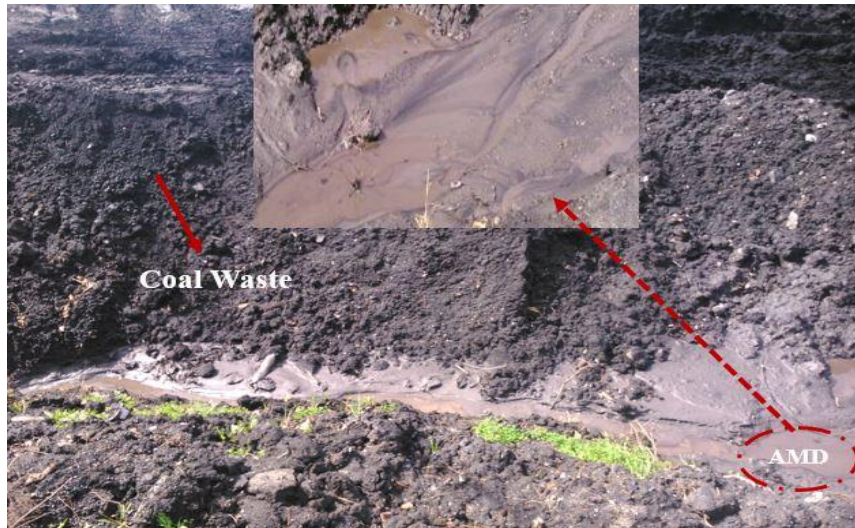
مقایسه و ارزیابی بیشتر علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی ذکر شده، مدول برجهندگی و عمر خستگی نمونه‌های حاوی CWP با CWA نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## 2- پروسه 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. مهمترین واحدهای این عملیات شامل سرندها، تمیزکردن، خرد کردن و جداسازی می‌باشد. روش پر عیار کردن ثقلی به وسیله تجهیزات موسوم به جیگ برای زغال‌ها با اندازه متوسط و درشت و فلو تاسیون برای زغال‌های ریز انجام می‌گیرد [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 557 میلیون تن می‌باشد. زغالسنگ خام از معادن مختلف شامل کارمزد، انجیر تنگه، پل سفید و جنوب زیراب، به منظور انجام عملیات فرآوری وارد سکوی پذیرش کارخانه زغالشویی می‌شوند. زغالسنگ‌های خام معادن با هم مخلوط شده و پس از خرد شدن توسط دستگاه‌های مخصوص، سرندها و به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل زغال‌های با اندازه بزرگتر از 80 میلیمتر می‌باشد که پس از انجام عملیات سنگجوری به کنستاتره زغال تبدیل می‌شوند. گروه دوم شامل زغال‌های با اندازه کوچکتر از 80 میلیمتر توسط نوار نقاله‌های موجود وارد سرندها بعدی شده و خود به دو دسته تقسیم می‌شوند. زغال‌های با اندازه 0/5 تا 80 میلیمتر وارد تجهیزات جیگ شده و طی عملیات فرآوری ثقلی قسمتی از آن به کنستاتره و قسمت دیگر آن به ضایعات تبدیل می‌شوند. دسته دوم زغال‌های کوچکتر از 0/5 میلیمتر می‌باشند که طی انجام عملیات فلو تاسیون بخشی به کنستاتره و بخش دیگر به ضایعات تبدیل می‌شوند. در این مطالعه از ضایعاتی که توسط روش فرآوری ثقلی (جیگ ماشین) بدست آمده، استفاده شده است. 40 تا 45 درصد از زغالسنگ‌های ورودی به کارخانه به ضایعات تبدیل شده که در محوطه اطراف کارخانه با مساحت حدود 2 هکتار دپو می‌شود. از سال 1988 تاکنون حدود 1/5 میلیون تن از این ضایعات انباشت شده و بسته به تولید کارخانه روزانه معمولاً 250 تن به این مقدار اضافه می‌شود. [ادیبی، اصائلو و مهدی رحمان‌پور، 1391].

## 3- اثرات زیست محیطی پسماند زغالسنگ

یکی از مسائل مهم ایجاد شده ناشی از دپو پسماند زغالسنگ مشکل جدی زیست محیطی می‌باشد. مشکل آلودگی در معادن زغالسنگ بطور کلی ناشی از اکسیداسیون پیریت می‌باشد. هنگامی که که پیریت و مواد حاوی آهن در معرض آب یا هوا و یا هردوی آن قرار می‌گیرند، دستخوش اکسیداسیون سریع خواهند شد که منجر به تولید آب‌های اسیدی می‌شود. آلودگی ناشی از آب‌های اسیدی معدنی (AMD<sup>6</sup>) به عنوان مهمترین آلاینده آب در اطراف معادن به شمار می‌آید، که شامل سولفات آهن و مواد دیگری است که می‌تواند منابع آب را آلوده کنند [Canovas, 2007]. AMD به عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی آب شناخته می‌شود. این زهاب‌ها با PH کم شامل مقادیر زیاد آهن، SO<sub>2</sub>، و مقادیر متغیری از فلزات سمی می‌باشد [Lee JS, Chon, 2007]. در شکل 1 نمونه‌ای از پساب‌های ناشی از زغالسنگ ضایعاتی مشاهده می‌شود.



شکل 1- آب‌های اسیدی تولید شده از پسماند زغالسنگ

از جمله مشکلاتی دیگری که دامپ‌های پسماند زغالسنگ ایجاد می‌کنند می‌توان به از بین بردن پوشش‌های گیاهی منطقه، تخریب مناظر و ایجاد گرد و غبار به هنگام وزش شدید باد در منطقه اشاره کرد. در شکل 2 بخشی از دپو پسماند زغالسنگ البرز مرکزی نشان داده شده است. همچنین با افزایش استخراج زغالسنگ در این منطقه به منظور تامین انرژی کارخانه‌های ذوب آهن، حجم باطله‌های زغالسنگ در اطراف معادن و کارخانه‌های زغال‌شویی افزایش یافته است. بنظر می‌رسد یکی از راه‌های رهایی از معضل دپوی این مواد استفاده از آن‌ها در صنعت ساخت و ساز بویژه راهسازی می‌باشد [ادیبی، اصائلو و مهدی رحمان‌پور، 1391].



شکل 2- بخشی از دپو پسماند زغالسنگ البرز مرکزی مازندران

#### 4- 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 5 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.

#### 1-4 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 25 میلیمتر بوده است. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D3515 انجام شده و نتایج بدست آمده در جدول 1 ارائه شده است. همچنین در این جدول حد بالا و پایین دانه‌بندی مطابق دانه‌بندی شماره 3 آیین نامه مشاهده می‌شود. سایر مشخصات مصالح سنگی در جدول 2 ارائه گردیده است.

جدول 1 - دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک (mm)	حد بالا و پایین دانه بندی (mm)	درصد رد شده (mm)
25	100	100
19	100-90	95
9/5	80-56	75
4/75	65-35	60
2/36	49-23	41
0/3	19-5	11
0/075	8-2	7

جدول 2- خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
سایش لس آنجلس	ASTM-D131	%	65/15
مقاومت فشاری	ASTM-D692	Kg/cm <sup>2</sup>	2800
وزن مخصوص	ASTM-C127	gr/cm <sup>3</sup>	2/63
مقاومت ضربه‌ای	ASTM-D5821	%	23
جذب رطوبت	ASTM-C127	%	1/01

#### 2-3 قیر

قیر مصرفی در این تحقیق شامل قیر خالص 85-100 تولید پالایشگاه تهران بوده است. مشخصات قیر طبق دستورالعمل ASTM-D1856 تعیین شده و در جدول 3 ارائه داده شده است.

جدول 3- مشخصات قیر مصرفی

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
نقطه نرمی	ASTM D36	°C	48
درجه نفوذ	ASTM D5	0/1mm	91/72
درجه اشتعال	ASTM D92	°C	310
کشسانی	ASTM D11	cm	>100
وزن مخصوص	ASTM D70	gr/cm <sup>3</sup>	0/998

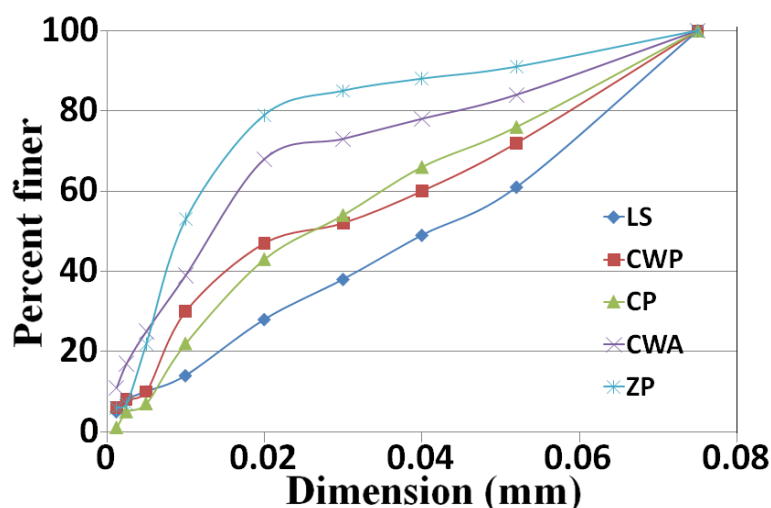
### 3-3- فیلر

در این مطالعه از 4 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 4 نشان داده شده است.

جدول 4- وزن مخصوص فیلرهای مصرفی

فیلر	CWA	CWP	LS	ZP	CP
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	2/64	2/12	2/64	1/9	3/15

برای تعیین دانه‌بندی فیلرهای مصرفی در این مطالعه از آزمایش هیدرومتری استفاده شده است. آزمایش هیدرومتری بر پایه اصول ته نشینی دانه‌ها و بر اساس استاندارد ASTM: D422 انجام گرفت [ASTM: D 422, 2002] و نتایج آن در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 3 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 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 3- دانه‌بندی فیلهای مصرفی در این تحقیق

### CWP 1-3-3

پسماند زغالسنگ استفاده شده در این مطالعه از روش جیگ تهیه شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی ارائه در جدول 5 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 200 آن مورد استفاده قرار گرفت. در جدول 5 ترکیب شیمیایی این ماده نشان داده شده است.

### CWA 2-3-3

اثرات مخرب کربن نسوخته به خصوص در سیمان مورد استفاده در مخلوطهای بتنی یکی از ویژگی‌های مورد توجه محققین 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 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 13 - ASTM D7348 مربوط به آنالیز نمونه خاکستر زغالسنگ و کک استفاده شد. CWP در 4 دمای 450، 750، 950 و 1000 درجه سانتیگراد به مدت 5 ساعت در کوره‌های مخصوص سوزانده و سپس برای هر 4 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 750 درجه خیلی محسوس نبوده و از نظر زیست محیطی هم باعث آلودگی می‌شود، دمای 750 درجه به عنوان دمای سوزاندن CWP تعیین گردید. همانطور که در جدول 5 ترکیب شیمیایی CWA نشان داده شده است مقدار کربن نسوخته از 40/96 درصد به 2/01 درصد کاهش یافت.

### CP -3-3-3

امروزه از سیمان پرتلند بعنوان فیلر در تهیه مخلوطهای آسفالتی بصورت فراوان استفاده می‌شود. سیمان پرتلند به عنوان یک فیلر فعال باعث افزایش چسبندگی قیر و سنگ شده و عملکرد مخلوط را تحت تاثیر قرار می‌دهد. سیمان استفاده شده در این مطالعه از نوع سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکا می‌باشد. در جدول 4 ترکیب شیمیایی CP نشان داده شده است.

### ZP-4-3-3

ژئولیت از دسته کانی‌های رسی است که همچون کانی‌های رسی از پایه هیدروسلیکاتهای 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 ژئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. فعالیت پوزولانی ژئولیت بستگی به ترکیب شیمیایی و کانی شناسی آن دارد. مساحت سطح بالای آن مبنای واکنش پذیری زیاد آن می‌باشد. خواص پوزولانی ژئولیت بعلت وجود  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  در ترکیب شیمیایی آن می‌باشد [Chan, 1999]. بطور کلی بیش از 40 نوع کانی ژئولیت طبیعی کشف و بیش از یکصد و پنجاه نوع ژئولیت مصنوعی ساخته شده است. ژئولیت‌های موجود در ایران از نوع رسوبی می‌باشند. ژئولیت استفاده شده در این مطالعه از نوع طبیعی و از معدن آبگرم سمنان تهیه شده است. ژئولیت مورد استفاده در کارخانه سنگ ژئولیت، آسیاب و به اندازه کمتر از 0/075 میلیمتر تبدیل شد. در جدول 4 ترکیب شیمیایی ZP مصرفی در این تحقیق نشان داده شده است.

### LS-5-3-3

سنگ آهک، سنگی رسوبی با منشأ شیمیایی یا زیست شیمیایی که بیشتر از کلسیم کربنات 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 بعنوان فیلر مرجع در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

ترکیب شیمیایی CWP، CWA، ZP، CP و LS توسط آزمایش پراش اشعه ایکس (XRF<sup>8</sup>) طبق استاندارد ASTM C 618 انجام شده و ترکیبات شیمیایی شناسایی شده مطابق جدول 5 می‌باشد.

جدول 5- درصد ترکیب شیمیایی CWP، CWA، LS، ZP، CP و LP مورد استفاده در تحقیق

عنوان	CWP	CWA	LS	ZP	CP
SiO <sub>2</sub>	34/80	55/63	17/95	67/44	21/9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14/53	23/25	0/46	10/90	5/86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3/89	8/09	0/05	0/84	3/30
MgO	0/87	1/54	3/64	0/33	1/15
CaO	0/51	2/28	46/90	1/24	63/32
Na <sub>2</sub> O	0/27	0/59	0/08	3/71	0/36
K <sub>2</sub> O	2/39	3/96	0/10	4/39	0/56
TiO <sub>2</sub>	0/98	1/63	0/03	0/19	0/27
L.O.I	40/96	2/01	29/95	11/05	2/40



## 5- آزمایش‌ها و طرح اختلاط

### 5-1- 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 10/6 و ارتفاع 63/5 می‌باشد. 18 نمونه با درصدهای 3/5، 4، 4/5، 5، 5/5 و 6 درصد وزنی قیر (به ازاء هر درصد سه نمونه) طبق استاندارد ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های استقامت مارشال، روانی، وزن مخصوص حقیقی و حداکثر برای تعیین قیر بهینه انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده قیر بهینه برای تمامی فیلرها تعیین گردید. فیلر ZP دارای قیر بهینه 5/4، 5/1 CP، 5/2 CWP، 5/2 LS و 5 CWA درصد انتخاب گردید. همچنین فیلر مصرفی 7 درصد وزن کل سنگدانه را شامل شده و تمامی فیلرها بصورت 100 درصد جایگزین LS شده است. برای انجام آزمایش مقاومت مارشال، روانی، کشش غیر مستقیم، مدول برجهنگی، خستگی و حساسیت رطوبتی سه نمونه در حالت خشک و سه نمونه در حالت اشباع بازای هر یک از پنج فیلر ساخته شد.

### 5-2- 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 30 دقیقه در حمام آب 60 درجه قرار گرفته و بعد مورد آزمایش قرار بگیرند. ولی در حالت اشباع بعد از ساخت، نمونه‌ها را باید 24 ساعت در حمام آب 60 درجه قرار داد و سپس آزمایش استقامت مارشال انجام گیرد. روانی مارشال شامل تغییر شکل عمودی نمونه‌های تحت آزمایش از ابتدای 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<sup>9</sup>) 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].

### 5-3- کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS<sup>10</sup>) 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 بدست 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 (1) مقاومت کششی تعیین می‌گردد [AASHTO T283, 1995]:

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

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

#### 4-5- مدول برجهندگی

مدول برجهندگی مخلوطهای آسفالتی که طبق استاندارد ASTM D4123 به روش کشش غیرمستقیم اندازه گیری می شود، یکی از رایج ترین روش های تعیین 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 شکل های ماندگار می شوند. اما در صورتی که بار اعمالی در مقایسه با مقاومت ماده کوچک بوده و بصورت مکرر اعمال شود، تغییر شکل ایجاد شده در هر سیکل بارگذاری تقریباً به طور کامل برگشت پذیر بوده و در این شرایط می توان ماده را الاستیک فرض کرد [Kavussi, Modarres, 2011].

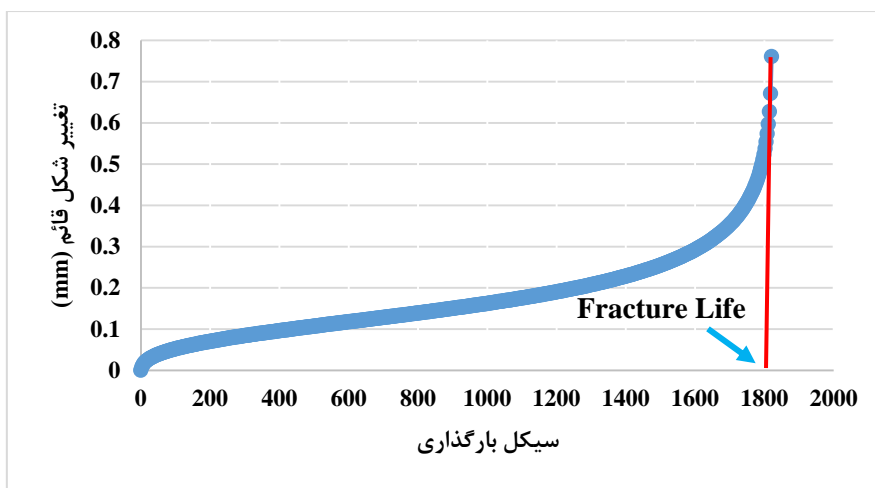
برای یک بار دینامیکی با حداکثر اندازه  $P$  که تغییرشکل های افقی ناشی از آن اندازه گیری شده اند، مدول برجهندگی کل با استفاده از رابطه (2) به دست می آید [ASTM D4123-82, 2003]:

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

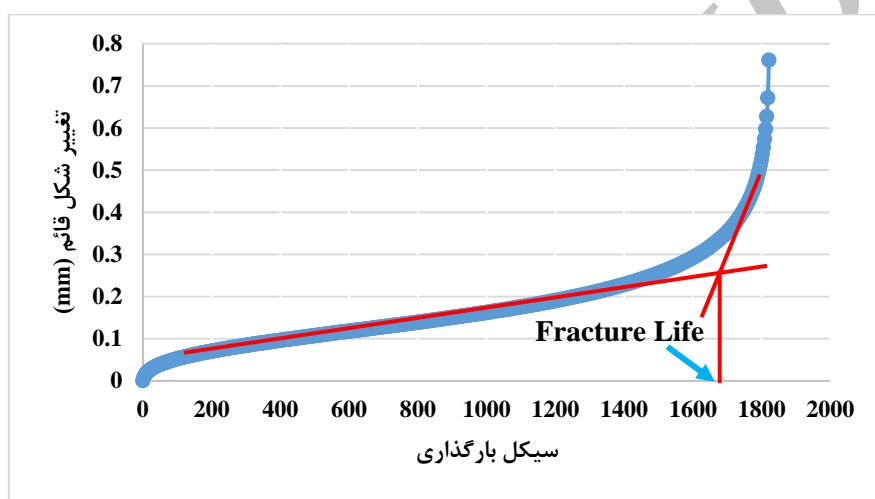
در این رابطه  $M_r$ : مدول برجهندگی (MPa)،  $P$ : حداکثر بار دینامیکی (N)،  $\mu$ : ضریب پواسن (0/35)،  $t$ : طول نمونه (mm) :  $\delta_h$ : تغییرشکل افقی برگشت پذیر کل (mm) می باشند. آزمایش مدول برجهندگی با استفاده از دستگاه UTM<sup>11</sup>-14P انجام شد. آزمایش در دمای 20°C انجام گرفت. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، فرکانس بارگذاری یک هرتز، مدت اعمال بار 0/1 ثانیه، زمان استراحت 0/9 ثانیه در نظر گرفته شد. تعداد پیش بارگذاری 100 سیکل بوده و آزمایش برای هر نمونه در یک سطح تنش (20 درصد مقاومت کششی در شرایط دمایی و عمر مشابه) انجام شد. ضریب پواسن 0/35 فرض گردید. همچنین تغییرشکل افقی توسط دو LVDT ثبت می شود.

#### 5-5- خستگی

خستگی یکی از خرابی های مهم و قابل توجه در روسازی بوده که در اثر تکرار بارگذاری به وجود می آید. این روش بارگذاری مشابه آزمایش مدول برجهندگی می باشد و اعمال بار تا شکست کامل نمونه ادامه دارد. نمودار تغییر شکل قائم نمونه تحت بارگذاری در شکل 4 نشان داده شده است. در تست خستگی کششی غیر مستقیم تعریف های مختلفی برای عمر شکست نمونه ها ارائه شده است در شکل 4 دو تعریف برای عمر شکست نمونه ها ارائه شده است. بر طبق EN-12697-24، عمر شکست برابر کل سیکل بارگذاری که منجر به شکست کامل می شود، می باشد [EN 12697-24, 2004]. مطابق شکل 4 الف، طبق تعریف مجانب تغییر شکل بصورت قائم می باشد. همانطور که در شکل 4 ب نشان داده شده است، طبق این تعریف معیار عمر خستگی زمانی در نظر گرفته می شود که نرخ ثابت افزایش تغییرشکل های افقی مطابق شکل تسریع می گردد [Hiago, Kim, Lee, 2008]. پس از این مرحله، ترکی های تار مویی و ریز در نمونه بهم متصل شده باعث شکست نمونه می شوند.



(الف)



(ب)

شکل 4 - تعریف عمر شکست در آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم

در این تحقیق بار اعمالی در آزمایش خستگی 30 درصد تنش کششی غیر مستقیم می باشد. دما توسط محفظه دمایی کنترل شده و آزمایش در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  صورت پذیرفت. زمان سیکل بارگذاری  $1/5$  ثانیه، مدت زمان بارگذاری  $0/25$  ثانیه و مدت زمان استراحت  $1/25$  ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین خستگی نمونه بصورت گسیختگی نمونه و تغییر شکل قطری 9 میلیمتر تعریف شده است. برای انجام آزمایش از دستگاه تست UTM استفاده شده و بارگذاری تا شکست کامل نمونه ادامه دارد.

#### 5-6- حساسیت رطوبتی

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 24 ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب 60 درجه سانتیگراد قرار گرفته ( $M_s$ ) به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که 30 تا 40 دقیقه در داخل آب 60 درجه قرار گرفته ( $M_d$ ) محاسبه شد. باید توجه داشت که مقدار بدست آمده نباید کمتر از 75 درصد باشد. این روند برای تمام نمونه ها طبق

استاندارد صورت گرفته و حساسیت رطوبتی تمام نمونه‌ها طبق رابطه (2) تعیین شد. برای تعیین حساسیت رطوبتی از طریق مقاومت کششی ( $ITS_s$ ) طبق استاندارد ASHTTO-T283 از هر درصد 3 نمونه بدون تاثیر رطوبت ( $ITS_d$ ) و 3 نمونه برای حالت اشباع ( $ITS_s$ ) با میزان 7 درصد فضای خالی در نظر گرفته شده است. در حالت خشک نمونه‌ها به مدت 2 ساعت در آب 25 درجه سانتیگراد نگهداری می‌شوند. نمونه‌های مرطوب داخل دستگاه خلاء به مدت 5 تا 10 دقیقه تحت فشار 67 کیلوپاسکال قرار گرفته و پس از گذراندن زمان 5 تا 10 دقیقه در حمام آب 25 درجه قرار می‌گیرند. پس از آن، نمونه‌ها توسط سلفون پوشانده شده و در یک کیسه پلاستیکی به همراه 10 میلی لیتر آب درون فریز با دمای  $3 \pm 18$ - درجه سانتیگراد به مدت 24 ساعت قرار داده می‌شود. سپس نمونه‌ها در یک دوره 24 ساعته درون حمام آب 60 درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند. در پایان نمونه اشباع 2 ساعت درون حمام آب با دمای 25 درجه سانتیگراد قرار گرفته و سپس مقاومت کششی آن از طریق رابطه (1) محاسبه می‌شود. TSR بدست آمده از رابطه (4) برای شرایط فوق نباید کمتر از 80 درصد باشد.

(3)

در رابطه (3)  $M_d$  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 (4)  $ITS_s$  و  $ITS_d$  به ترتیب مقاومت کششی غیر مستقیم خشک و اشباع بر حسب کیلو پاسکال و TSR نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک می‌باشد.

## 6- نتایج و بحث

در جدول 6 نتایج بدست آمده از آزمایش مارشال برای فیلرهای مورد مطالعه نشان داده شده است. مطابق شکل محدوده استقامت مارشال بین 8/75 تا 12/64 کیلو نیوتن بوده و برای تمام نمونه‌ها از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه برای ترافیک سنگین (8 KN) بیشتر می‌باشد [ASTM: D 1559, 1998]. همانطور که در جدول 6 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]

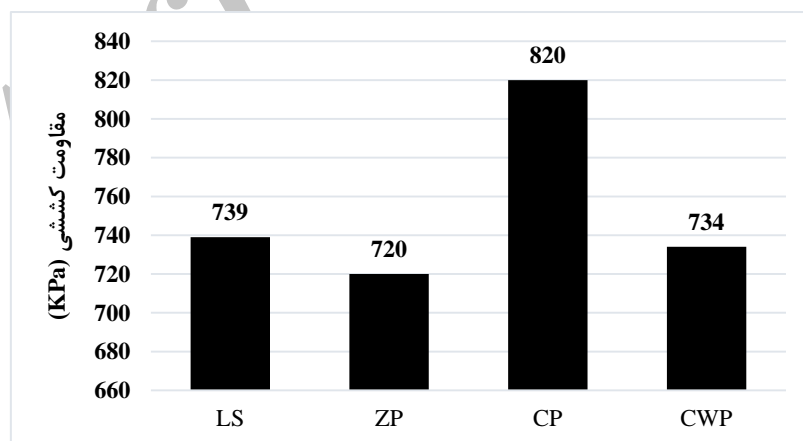
همچنین در جدول 6 مقدار روانی مخلوط‌های حاوی فیلرهای مختلف نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی CP و ZP کمترین مقدار روانی را دارا می‌باشند که بیانگر تغییر شکل کمتر و اصطکاک داخلی بیشتر ذرات تشکیل دهنده آنها است. بیشترین مقدار روانی مربوط به نمونه حاوی فیلر LS می‌باشد. نمونه حاوی 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 6، 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( et al), 2011 ].

جدول 6- نتایج آزمایش مارشال

نوع مخلوط	LS	ZP	CP	CWP
استقامت مارشال (KN)	8/75	9/00	12/64	10/20
روانی (mm)	3/13	2/8	2/5	3
MQ (KN/mm)	2/80	3/87	5/06	4/20

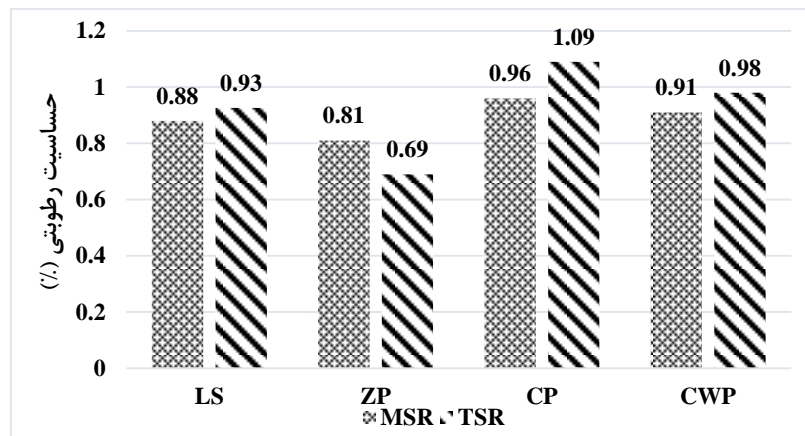
در شکل 5 نمودار تاثیر فیلرهای مورد مطالعه را بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد. محدوده مقاومت کششی فیلرها بین 720 تا 820 کیلوپاسکال می‌باشند. بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به مخلوط حاوی فیلر CP و کمترین مقدار مربوط به مخلوط حاوی ZP می‌باشد. مقاومت کششی نمونه CWP کمی کمتر نسبت LS بوده ولی تفاوت زیادی نسبت به CP داشته که یکی از علت‌های این امر وجود ترکیبات پزولانی و آهکی در کنار هم در مخلوط حاوی CP می‌باشد. بطور 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 5- مقایسه مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی فیلرهای مورد استفاده در این تحقیق

در شکل 6 تغییرات MSR و TSR مخلوط‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. تمامی نمونه‌های مورد آزمایش بیشتر از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه (75 درصد) می‌باشند. مطابق شکل 6 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 5 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 6، TSR بدست آمده از تمامی نمونه‌ها بجز ZP بیشتر از حداقل مقدار تعیین شده در آیین‌نامه (80 درصد) می‌باشند. همچنین کمترین مقدار MSR و TSR در بین نمونه‌ها مربوط به نمونه ZP است.



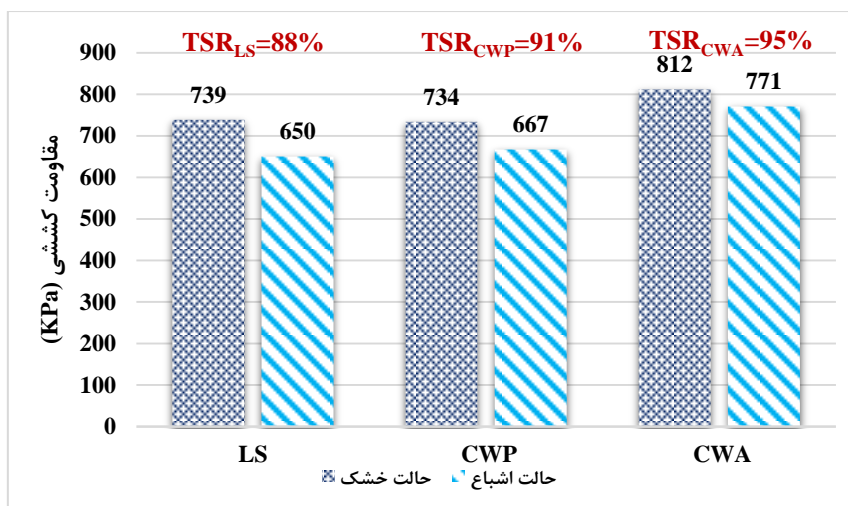
شکل 6- مقایسه پارامترهای حساسیت رطوبتی نمونه‌های حاوی فیلهای مورد مطالعه در این تحقیق

در جدول 7 نتایج استقامت مارشال نمونه CWP با خاکستر آن و LS ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد بعد از سوزاندن پسماند زغالسنگ مقاومت مارشال، روانی و نسبت مارشال بهبود پیدا کرده‌اند. مطابق جدول 5 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 7- نتایج آزمایش مارشال CWP با خاکستر آن و فیله مرجع

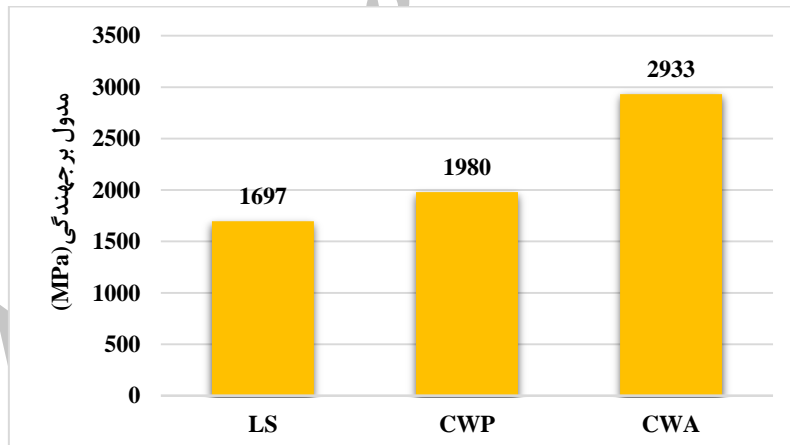
	LS	CWP	CWA
استقامت مارشال (KN)	8/75	10/20	12/60
روانی (mm)	3/13	3	2/5
MQ (KN/mm)	2/80	4/20	5/04
MSR	98	96	98

در شکل 7 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 افزایش میزان TSR قبل و بعد از سوزاندن زغالسنگ می‌توان به افزایش خاصیت پوزولانی و آهکی و کاهش 39 درصدی شاخص LOI خاکستر آن بعد سوزاندن اشاره کرد.



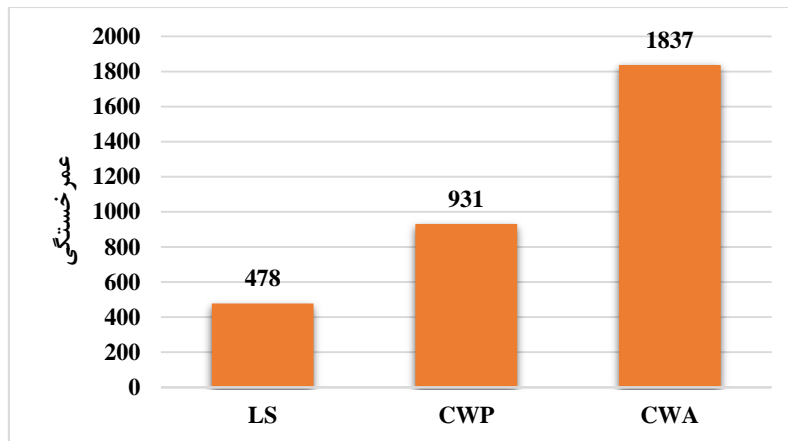
شکل 7- مقایسه مقاومت کششی CWP با خاکستر آن و فیلر مرجع

در شکل 8 مقایسه مدول برجهنگی فیلرهای 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 8 مشخص است بیشترین مدول برجهنگی مربوط به نمونه CWP و CWA می‌باشد. خاصیت پوزولانی بالای این نمونه‌ها نسبت به فیلر LS از عوامل افزایش مدول برجهنگی آن‌ها بوده است. بعد از سوزانده شدن خاصیت پوزولانی و همچنین آهکی آن نسبت به CWP بیشتر شده که باعث افزایش چسبندگی بین سنگدانه و قیر گردیده که در نتیجه افزایش مدول برجهنگی را به همراه داشته است.



شکل 8- مقایسه مدول برجهنگی CWP با خاکستر آن و فیلر مرجع

در شکل 9 تغییرات عمر خستگی فیلرهای 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. فیلر حاوی CWP نیز عمر خستگی بیشتری نسبت به فیلر LS داشته است.



شکل 9- مقایسه عمر خستگی CWP با خاکستر آن و LS

بر اساس نتایج بدست 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 می تواند 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. بررسی های انجام شده در این تحقیق حاکی از آن است که در تمامی نمونه های 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 آزمایش های دوام برای زغالسنگ طبیعی و خاکستر آن تفاوت قابل توجهی ندارد. اما با توجه به هزینه بالا پروسه تبدیل پسماند زغالسنگ به خاکستر و آلودگی های زیست محیطی ناشی از آن، و همچنین نتایج قابل قبول تست های CWP در برابر فیلرهای دیگر، هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ زیست محیطی استفاده از CWP در حالت خام را می توان به عنوان جایگزین فیلر معدنی در مخلوط های آسفالت گرم پیشنهاد کرد.

## 7- نتیجه گیری

در این تحقیق ویژگی های مکانیکی مخلوط های حاوی فیلر پسماند زغالسنگ با فیلرهای دیگر مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در بخش اول مخلوط های حاوی پودر پسماند زغالسنگ با فیلر مرجع سنگ آهک و فیلرهای پوزولانی سیمان و ژئولیت و در بخش دوم با خاکستر آن با انجام آزمایش های مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. براساس تحلیل های آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر قابل توجه است:

1- در بین فیلرها به ترتیب نمونه های 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 نمونه ها و مقاومت بالای نمونه در برابر شیار شدگی و تغییر شکل ماندگار می باشد. این نتایج نشان دهنده می توان از CWP در مناطق آب و هوایی گرم با ترافیک سنگین استفاده نمود. فیلر LS نیز بدترین نتایج را در بین نمونه ها داشته ولی حداقل مقدار تعیین شده در استاندارد را رعایت نموده است.



2- مقاومت کششی CWP با 734 کیلو پاسکال نسبت به CP مقاومت کمتری داشته و تقریباً مشابه LS عمل 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 720 کیلو پاسکال بوده است.

3- نمونه‌های حاوی فیلر CWP در حساسیت رطوبتی نتایج رضایت بخشی داشته است. MSR نمونه‌های حاوی فیلر CWP با 0/91 درصد و TSR آن با 0/98 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 فیلرها داشته است. تمامی فیلرها 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 750 درجه تبدیل شدن آن به خاکستر گردید. برای مقایسه بیش تر مخلوط‌های حاوی CWP، CWA و LS با هم مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر بدست آمد:

4- نتایج آزمایش مارشال نشان دهنده آن بود که CWA با استقامت 12/60 کیلونیوتن، روانی 2/5 میلیمتر و نسبت مارشال 5/04 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.

5- 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.

6- نتایج حاصل از مدول برجهنگی مخلوط‌های حاوی CWP، CWA و LS نشان می‌دهد، CWA با 2933 مگاپاسکال بهترین نتیجه را داشته که علت آنرا خاصیت پوزولانی بالا که باعث افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه شده دانست. همچنین CWP با 1980 مگاپاسکال نتیجه بهتری نسبت به فیلر مرجع داشته است.

7- نتایج حاصل از تست خستگی نشان می‌دهد نمونه حاوی فیلر CWA دارای عمر خستگی 1837 بیشترین مقاومت در برابر تکرار بارگذاری در بین فیلرهای 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.

8- باید توجه داشت فیلرهای 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. بعنوان یه جمع‌بندی کلی با توجه به نتایج رضایت‌بخشی بدست آمده از آزمایش‌ها، استفاده از پسماند زغالسنگ در حالت خام علاوه بر صرفه جویی اقتصادی و حفظ محیط زیست می‌تواند بعنوان فیلر جایگزین در مخلوط‌های آسفالتی گرم بویژه در مناطق گرمسیر با ترافیک سنگین توصیه شود.

- 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
- 14- Tensile strength ratio

## 8- مراجع

- امیر محمد طباطبائی، (1380)، کتاب روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- نبی اله ادیبی، مرتضی اصانلو، مهدی رحمان پور، (1391)، "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, 156-1.
- Canovas CR, Olias M, Nieto JM, Sarmiento AM, Ceron JC (2007), "Hydrogeochemical characteristics of the Tinto and Odiel Rivers (SW Spain)". Factors controlling metal contents. Sci Total Environ 373:363–382.
- 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, 293-300.
- EN 12697-24. (2004), "Bituminous mixtures-test methods for hot mix asphalt - part 24: resistance to fatigue. European committee for standardization".
- 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: 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. 23: 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: 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):p 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), "Hydrogeochemical characteristics of acid mine drainage in the vicinity of an abandoned mine", Daduk Creek, Korea. *J Geochem Explor* 88:37–40.
- Lee ST. (2009), "Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack". *Waste Manage*; 29(8), p2385–91
- 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): 36-44.
- Masashi .K, Takeshi .K, Youichi .S. (2000) "MSW fly ash stabilized with coal ash for geotechnical application". *J Hazard Mater*;76:265–83.
- 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, p 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): 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, 2<sup>nd</sup> 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". 10<sup>th</sup> 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: 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: 191-200.
- Setiadjji B.H, (2005), " Use of waste materials for pavement construction in Indonesia", *Journal of the Institution of Engineers*, 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, p84–96.
- Taha R, Al-Rawas A, Al-Harthy A. and A Qatan A, (2002), " Use of Cement Bypass Dust as Filler in Asphalt Concrete Mixtures", *ASCE*:0899-1561, P338-343.
- Tayfur S, Ozen H, Aksoy A. (2007), "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers". *Construct Build Mater*; 21:321–8.
- 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. Mater.* 23: 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: 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: 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): 377-389

# 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. Dept , Babol Nooshirvani University of Technology,

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 a filler in hot mix asphalt is recommended.

**Keywords:** Coal waste, Hot mix asphalt, filler, pozzolan.