

## تأثیر فیلر زغال‌سنگ ضایعاتی و خاکستر آن بر مقاومت و دوام مخلوط آسفالت گرم در مقایسه با پودر سنگ آهک

امیر مدرس\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
مرتضی رحمانزاده، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

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

دریافت: ۹۲/۰۶/۱۴ - پذیرش: ۹۲/۰۹/۲۵

### چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر پودر زغال‌سنگ ضایعاتی به‌عنوان فیلر بر ویژگی‌های مخلوط آسفالتی گرم می‌باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی، با بهره‌گیری از فیلر زغال‌سنگ ضایعاتی، اقدام به ساخت نمونه‌های حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی فیلر بجای پودر سنگ آهک شده و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر زغال‌سنگ ضایعاتی با آزمایش‌های مقاومت مارشال و کشش غیر مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. مقاومت مارشال، روانی، مقاومت کششی و دوام مخلوط‌های آسفالتی تعیین و تأثیر ترکیب پودر زغال‌سنگ ضایعاتی و پودر سنگ آهک بر خصوصیات مخلوط ارزیابی شد. در ادامه، پودر زغال‌سنگ ضایعاتی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شد و تبدیل به خاکستر گردید. این خاکستر به‌عنوان فیلر در مخلوط آسفالت گرم استفاده و با فیلرهای دیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد پودر زغال‌سنگ ضایعاتی باعث بهبود ویژگی‌های مخلوط آسفالتی نسبت به فیلر سنگ آهک شده و بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق می‌توان استفاده از پودر زغال‌سنگ ضایعاتی را به‌عنوان جایگزین مناسبی برای فیلر معمولی پیشنهاد نمود. همچنین، نتایج حاکی از آن است که خاکستر زغال‌سنگ ضایعاتی عملکرد بهتری نسبت به دیگر فیلرهای مورد استفاده در این تحقیق داشته است.

واژه‌های کلیدی: زغال‌سنگ ضایعاتی، فیلر، مخلوط آسفالت گرم، پودر سنگ‌آهک.

### ۱. مقدمه

را به حداقل رسانده و باعث بهبود عملکرد روسازی شود (مونیانندی و همکاران، ۲۰۱۳). به دلیل هزینه‌های بالای احداث راه‌ها، مطالعات باید متمرکز به طراحی درست و انتخاب مواد مناسبی باشد که علاوه بر اقتصادی بودن بتواند باعث افزایش کارایی و طول عمر راه‌ها گردد (شرین و همکاران، ۲۰۱۲). تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی بستگی به عوامل مختلفی از جمله جنس فیلر، جنس مصالح و نوع قیر

رشد سریع تقاضای ترافیک و افزایش بارهای محوری مجاز مستلزم بهبود مواد در ساخت روسازی راه‌ها می‌باشد. ساخت روسازی ایمن، اقتصادی، با دوام و هموار که قادر به تحمل ترافیک و بارهای پیش‌بینی شده باشد از اهداف اصلی طراحان روسازی می‌باشد. برای رسیدن به این اهداف، کارشناسان، محققین و مهندسين به دنبال انتخاب موادی برای روسازی می‌باشند که خرابی‌ها

سارگین و همکاران (۲۰۱۳) اقدام به استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان فیلر در مخلوط آسفالت گرم نمودند. نتایج حاکی از آن بود که ۵۰٪ پوسته برنج و ۵۰٪ پودر سنگ آهک بهترین نتیجه را داشته و باعث بهبود استحکام مارشال و کاهش روانی شده است. چن و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی پتانسیل استفاده از سنگدانه ریزدانه بازیافتی به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم پرداخته‌اند. این فیلر از مصالح سنگدانه بتن بازیافتی تهیه شده بود. بررسی و تحلیل آزمایش‌ها نشان داد که این فیلر می‌تواند باعث بهبود حساسیت رطوبتی، عمر خستگی و ویژگی‌های مکانیکی در هر دو محدوده دماهای کم و زیاد شود. هوانگ و همکاران (۲۰۰۸) به تحقیق روی سنگ آهک بازیافتی به عنوان فیلر در مخلوط آسفالت گرم پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این فیلر ضایعاتی می‌تواند باعث بهبود تغییر شکل ماندگار، سختی و عمر خستگی در مخلوط آسفالت گرم شود. تانایا و فورت (۲۰۰۶) به بررسی آزمایشگاهی خاکستر زغال سنگ و نتایج حاصل از آن در دو مخلوط آسفالتی گرم و سرد پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که خاکستر زغال سنگ می‌تواند جایگزین فیلر معدنی در هر دو مخلوط آسفالتی گرم و سرد شود. بر مبنای توصیه آنها، بهتر است مخلوط آسفالتی گرم و سرد حاوی خاکستر زغال سنگ برای ترافیک‌های کم و متوسط مورد استفاده قرار گیرد.

زغال سنگ ضایعاتی در روسازی بتن بلوکی، تثبیت خاک، مصالح ساختمانی، تولید سیمان و مخلوط‌های سیمانی استفاده شده است. رسی دو ساتوس و همکاران (۲۰۱۲) زغال سنگ ضایعاتی را به عنوان ریزدانه در بتن‌های بلوکی روسازی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۲۵ تا ۵۰ درصد زغال سنگ ضایعاتی بجای ریزدانه، نتایج رضایت‌بخشی از نظر مقاومت مکانیکی حاصل می‌شود. گارسیا و همکاران (۲۰۱۲) زغال سنگ ضایعاتی را به عنوان بخشی از سیمان در مخلوط سیمانی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده به میزان ۲۰٪ بجای سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه را

دارد. چنانچه مخلوط آسفالتی از مقاومت خوبی برخوردار نباشد دچار اضمحلال زودرس می‌شود (گاردینر، ۲۰۰۹). فیلرها به عنوان یکی از مهمترین اجزای مخلوط آسفالتی نقش مهمی در تعیین ویژگی‌ها و عملکرد مخلوط آسفالتی دارند، به ویژه اینکه در چسبندگی، قفل و بست بین دانه‌ها و پر کردن فضای خالی بین سنگدانه‌ها تأثیر زیادی دارند. علاوه بر این می‌توانند بر روانی، حساسیت رطوبتی، سختی، دوام، عمر خستگی و شیار شدگی مخلوط آسفالتی نیز تأثیر گذارند (کژن و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، فیلرها در درجه بندی، شکل ذرات، حجم فضای خالی، ترکیب مواد معدنی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌باشند. به منظور بهبود عملکرد روسازی ضروری است از رفتار مناسب مخلوط قیری که اساساً بستگی به ترکیب قیر دارد اطمینان حاصل شود. بنابراین، انتخاب فیلر مناسب در مخلوط آسفالتی باعث بهبود عملکرد مخلوط خواهد شد (مونباندی و آبورکابا، ۲۰۱۱). به علت کاهش منابع طبیعی، افزایش روزافزون فعالیت‌های عمرانی و راه‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جنبه‌های زیست محیطی، محققین به دنبال پیدا کردن جایگزینی مناسب برای مصالح مصرفی در ساخت جاده‌ها می‌باشند (بیلماز و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، علاوه بر مواد ضایعاتی به دست آمده از پروژه‌های ساختمانی، ضایعات و مواد پسماند به دست آمده از کارخانجات صنعتی و معادن باعث افزایش نیاز به محل دپوی مواد پسماند شده است. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از مواد پسماند در ساخت راه‌ها توسط سازمان‌های مرتبط با محیط زیست و راه انجام شده است (لی، ۲۰۰۸؛ لی، ۲۰۰۹؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۰). در تحقیقات اخیر، استفاده از آهک ضایعاتی بازیافتی، فیلر ضایعاتی فسفات، خاکستر زباله‌های جامد شهری سوزانده شده و مواد سرامیکی ضایعاتی به عنوان فیلر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و نتایج آنها رضایت‌بخش توصیف شده است (کاتامین، ۲۰۰۶؛ سونگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ شو و همکاران، ۲۰۰۹).

پودر زغال سنگ ضایعاتی (CWP<sup>۱</sup>) با داشتن خاصیت پوزولانی و با دارا بودن سیلیس و آلومینا می تواند خواص مشابه پوزولان نوع F داشته و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شود. همچنین، استفاده از آنها از نظر هزینه نیز بسیار ناچیز یا حتی رایگان می باشد. از طرف دیگر، دپوی این ضایعات مشکلات فراوانی برای محیط زیست و منطقه ایجاد نموده است (اینوتیا و نیدزام، ۲۰۰۹؛ اسکارکینسکا، ۱۹۹۵).

هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی تأثیر فیلر زغال سنگ ضایعاتی بر ویژگی های فیزیکی و مقاومتی مخلوط آسفالتی گرم در مقادیر مختلف می باشد. آزمایش های انجام شده شامل آزمایش مارشال، مقاومت کششی و ارزیابی دوام مخلوطها بوده و بدین منظور از درصد های مختلف CWP بجای فیلر در مخلوط آسفالت گرم استفاده گردید. علاوه بر این، پس از سوزاندن CWP و تبدیل آن به خاکستر زغال سنگ ضایعاتی (CWA<sup>۲</sup>) تأثیر این ماده و پودر سنگ آهک (LM<sup>۳</sup>) نیز با CWP خام مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

## ۲. مواد و روشها

### ۲-۱. سنگدانه

از سنگدانه شکسته شده و تیز گوشه در تهیه مخلوطها استفاده شد. دانه بندی مورد استفاده، یک دانه بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر بوده است. آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM-D3515 انجام شد و نتایج به دست آمده در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین، در این شکل حد بالا و پایین دانه بندی مطابق دانه بندی شماره ۳ آیین نامه مشاهده می شود. سایر مشخصات مصالح سنگی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

افزایش داده ولی مقاومت ۹۰ روزه را کاهش می دهد. اینوتیا و نیدزام (۲۰۰۹) زغال سنگ ضایعاتی را در تثبیت اساس و زیراساس مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصله نشان از افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه، ۲۸ روزه و ۹۰ روزه داشته است.

زغال سنگ یکی از رایج ترین منبع تولید انرژی می باشد. زغال سنگ تولیدی در جهان حدود ۵/۵ میلیارد تن در سال است و حجم تولیدی آن در ایران به ۳۱۰ میلیون تن در سال می رسد. پس از بهره وری از آنها به مقاصد گوناگون، حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از آنها به صورت باطله دفن یا دپو می شود. معدن زغال سنگ البرز مرکزی مازندران واقع در سوادکوه یکی از قدیمی ترین معادن ایران با ذخایر احتمالی ۵۵۷ میلیون تن می باشد. در حال حاضر بیش از ۲ میلیون تن زغال سنگ ضایعاتی به صورت دپو شده موجود بوده، که مشکلات فراوانی ناشی از انباشت آنها به وجود آمده است. به نظر می رسد یکی از راه های رهایی از معضل دپوی این مصالح، استفاده از آنها در صنعت ساخت و ساز، به ویژه راه سازی، باشد (ادیبی و همکاران، ۱۳۹۱). در فرایند تولید زغال سنگ، زغالها شسته، دانه بندی و سازگار برای کاربرد در بخش های مورد نظر آماده می شوند. فرآوری زغال سنگ شامل فرایندهای فیزیکی است که با مرتب کردن دانه بندی و کاهش مواد معدنی موجود در آن، مانند خاکستر و گوگرد، موجب بهبود کیفیت آن می شود. مهمترین کارها و عملیاتی که روی زغال سنگ صورت می گیرد شامل غربالگری، شستشو، خرد کردن و جدا سازی مواد مایع و جامد یا آبگیری می باشد. البته آماده سازی زغال سنگ چیزی بیشتر از این موارد است و دارای عملیاتی پیچیده می باشد که باعث می شود بخشی از زغال سنگ که برای استفاده مفید نیست جدا سازی شود. کارخانه البرز مرکزی مازندران برای شستشوی زغال سنگ، از دو روش فرآوری (فلوتاسیون و جیگ) استفاده می کند. فلوتاسیون دارای ذرات ریزتر نسبت به جیگ بوده ولی خواص کمتری از زغال سنگ مینا را دارا می باشد (لاسکووسکی، ۲۰۰۱).

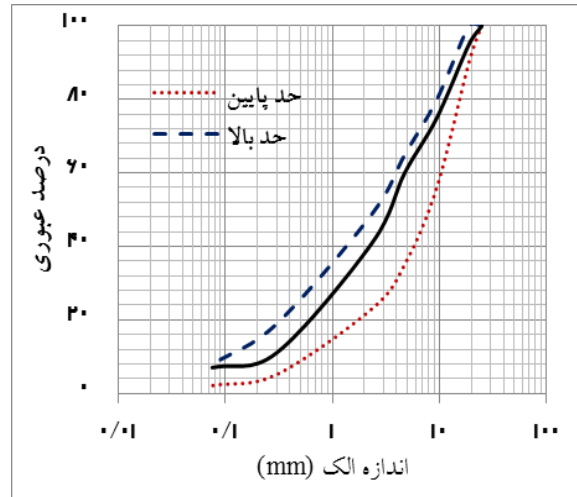
- 
- 1- Coal waste powder
  - 2 - Coal waste ash
  - 3- Limestone

تأثیر فیلر زغال سنگ ضایعاتی و خاکستر آن بر مقاومت و دوام مخلوط آسفالت گرم در مقایسه با پودر سنگ آهک

### ۲-۳. فیلر

#### ۲-۳-۱. پودر سنگ آهک

سنگ آهک، سنگی رسوبی با منشأ شیمیایی یا زیست‌شیمیایی که بیشتر از کلسیم‌کربنات تشکیل شده، یکی از متداول‌ترین فیلهای معدنی در ساخت بتن آسفالتی می‌باشد که اغلب نقش پرکننده در مخلوط را دارد (آندرسون و گوتز، ۱۹۷۳). پودر سنگ مصرفی در این تحقیق دارای وزن مخصوص  $1700 \text{ Kg/m}^3$  بوده است.



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

#### ۲-۳-۲. زغال سنگ ضایعاتی

همانطور که ذکر شد، در این تحقیق از زغال سنگ ضایعاتی موجود در محل دپوی کارخانه البرز مرکزی مازندران واقع در سوادکوه استفاده شده است. از سال ۱۳۶۸ کارخانه زغال‌شویی انجیرتنگه شرکت زغال سنگ البرز مرکزی با تکنولوژی غیرمدرن روسی شروع به کار کرد. این کارخانه برای شستشوی زغال سنگ از دو روش فرآوری فلوتاسیون و جیگ استفاده می‌کند و ضایعات به‌دست آمده از فرآوری در فضای آزاد در نزدیکی محل کارخانه دپو می‌شود. در این تحقیق، از جیگ به عنوان فیلر استفاده شد. بعد از انجام آزمایش حد روانی مشخص شد که باطله زغال سنگ مورد استفاده خاصیت خمیری نداشته است. زغال سنگ ضایعاتی مورد استفاده در این پژوهش پس از خشک شدن کامل، به صورت مصالح ریزتر از  $0.075$  آماده گردید.

#### ۲-۳-۳. خاکستر زغال سنگ ضایعاتی

برای تعیین دمای سوزاندن باطله زغال سنگ به منظور کاهش مقدار کربن آن، از آزمایش ASTM D7348-13 که مربوط به آنالیز نمونه خاکستر زغال سنگ و کک می‌شود، استفاده شد. زغال سنگ ضایعاتی در  $4$  دمای  $450$ ،  $750$ ،  $950$  و  $1000$  درجه سانتی‌گراد به مدت  $5$  ساعت در کوره‌های مخصوص سوزانده و سپس برای هر  $4$  دما

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
سایش لس آنجلس	ASTM-D131	%	۱۵/۵۶
مقاومت فشاری	ASTM-D692	$\text{Kg/cm}^2$	۲۸۰۰
وزن مخصوص	ASTM-C127	$\text{gr/cm}^3$	۲/۶۳
مقاومت ضربه‌ای	ASTM-D5821	%	۲۳
درصد جذب رطوبت	ASTM-C127	%	۱/۰۱

### ۲-۲. قیر

قیر مصرفی در این تحقیق شامل قیر خالص  $100-85$  تولیدی پالایشگاه تهران بود. مشخصات قیر طبق دستورالعمل ASTM-D1856 تعیین شده و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات قیر مصرفی

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
نقطه نرمی	ASTM D36	$^{\circ}\text{C}$	۴۸
درجه نفوذ	ASTM D5	mm	۹۱/۷۲
درجه اشتعال	ASTM D92	$^{\circ}\text{C}$	۳۱۰
وزن مخصوص	ASTM D70	$\text{gr/cm}^3$	۰/۹۹۸



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) فیلر CWP و ب) فیلر CWA

### ۳. آزمایش‌ها و طرح اختلاط

#### ۳-۱. ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق، از روش مارشال برای تهیه نمونه‌ها طبق دستورالعمل استاندارد ASTM-D1559 استفاده شده است. در این روش، هر نمونه استوانه‌ای دارای قطر ۱۰/۶ و ارتفاع ۶/۳۵ سانتی‌متر می‌باشد. هجده نمونه با درصد‌های ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد وزنی قیر (به ازای هر درصد سه نمونه) طبق استاندارد ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های مقاومت مارشال، روانی، وزن مخصوص و رایس برای تعیین قیر بهینه انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده، قیر بهینه برای فیلر LM برابر ۵/۲ درصد انتخاب گردید. برای انجام آزمایش مقاومت مارشال، روانی و کشش غیر مستقیم، سه نمونه از هر سه فیلر LM، CWP و CWA برای هر مقدار از فیلرها ساخته شد. در جدول ۴، انواع حالت‌های نمونه ساخته شده در این تحقیق جهت انجام آزمایش‌ها ارائه شده است. از هر حالت سه نمونه تهیه شد.

مقدار افت ناشی از حرارت (LOI) اندازه گرفته شد. طبیعتاً با افزایش دما، خاکستر تولیدی مقدار LOI کمتری دارد. از آنجا که تغییرات LOI در دمای بیش از ۷۵۰ درجه خیلی محسوس نبوده و از نظر زیست‌محیطی هم باعث آلودگی می‌شود، دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای مناسب جهت سوزاندن زغال‌سنگ ضایعاتی تعیین گردید. خاکستر حاصله به وسیله توزین پسماند باقی‌مانده ناشی از سوزاندن زغال‌سنگ تحت شرایط کاملاً کنترل شده تعیین شد. پس از اتمام عملیات، مقدار کربن از ۴۰/۹۶ درصد به ۲/۰۱ درصد کاهش یافت. ترکیب شیمیایی CWP، LM و CWA توسط آزمایش پراش اشعه ایکس (XRF<sup>۲</sup>) طبق استاندارد ASTM-E1621-05 انجام شده و ترکیبات شیمیایی شناسایی شده مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات CWA، CWP و LM

عنوان	آنالیز شیمیایی CWP (%)	آنالیز شیمیایی CWA (%)	آنالیز شیمیایی LM (%)
SiO <sub>2</sub>	۳۴/۸	۵۵/۶۳	۰/۶۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۴/۵۳	۲۳/۲۵	۰/۱۱
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۸۹	۸/۰۹	۰/۰۵
MgO	۰/۸۶۸	۱/۵۴	۰/۳۷
CaO	۰/۵۱۳	۲/۲۸	۵۵/۰۹
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۷	۰/۵۹	۰/۰۰
K <sub>2</sub> O	۲/۳۹	۳/۹۶	۰/۰۲
MnO	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲
TiO <sub>2</sub>	۰/۹۸۳	۱/۶۳	۰/۰۰
L.O.I	۴۰/۹۶	۲/۰۱	۴۳/۴۴

در شکل ۲ الف، وضعیت ظاهری فیلر CWP و در شکل ۲-ب فیلر CWA مشاهده می‌شود.

1- Loss on Ignition  
2- X-Ray diffraction

جدول ۴. ترکیب‌های مورد استفاده در تحقیق

ترکیب	توضیحات
A	۱۰۰ درصد سنگ آهک
B	۷۵٪ زغال سنگ ضایعاتی، ۲۵٪ سنگ آهک
C	۵۰٪ زغال سنگ ضایعاتی، ۵۰٪ سنگ آهک
D	۲۵٪ زغال سنگ ضایعاتی، ۷۵٪ سنگ آهک
E	۱۰۰٪ زغال سنگ ضایعاتی
F	۱۰۰٪ خاکستر زغال سنگ ضایعاتی

### ۳-۴. حساسیت رطوبتی

برای ارزیابی حساسیت رطوبتی در روش مارشال ( $MSR^1$ ) باید 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 شود. براساس دستورالعمل موجود، مقدار نسبت فوق نباید کمتر از ۷۵٪ باشد. این روند برای تمام نمونه‌ها طبق استاندارد صورت گرفته و طبق رابطه (۲) تعیین شد. برای تعیین حساسیت رطوبتی از طریق مقاومت کششی ( $TSR^2$ ) طبق استاندارد ASHTTO-T283 از هر درصد ۳ نمونه بدون تأثیر رطوبت ( $ITS_d$ ) و ۳ نمونه برای حالت اشباع ( $ITS_s$ ) با میزان ۷٪ فضای خالی در نظر گرفته شد. در حالت خشک، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌های مرطوب داخل دستگاه خلأ به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه تحت فشار ۶۷-۱۳ کیلوپاسکال قرار گرفته و پس از گذراندن زمان ۵ تا ۱۰ دقیقه در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد به گونه‌ای اشباع می‌شوند که درجه اشباع نمونه‌ها حداقل ۷۰٪ باشد. پس از آن، نمونه‌ها توسط سلفون پوشانده شده و در یک کیسه پلاستیکی به همراه ۱۰ میلی‌لیتر آب درون فریزر با دمای  $3 \pm 18$ - درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها در یک دوره ۲۴ ساعته درون حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در پایان، نمونه اشباع ۲ ساعت درون حمام آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس مقاومت کششی آن از طریق رابطه (۱) محاسبه شد. نسبت  $TSR$  به‌دست آمده از رابطه (۳) برای شرایط فوق نباید کمتر از ۸۰٪ باشد.

$$MSR = \frac{M_s}{M_d} \times 100 \quad (2)$$

$$TSR = \frac{ITS_s}{ITS_d} \times 100 \quad (3)$$

### ۳-۲. استقامت مارشال

برای انجام این آزمایش، طبق استاندارد، ترکیب‌های جدول ۴ ساخته شد و در شرایط خشک و اشباع عمل‌آوری شدند. 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 گیرند. 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. در این آزمایش، همچنین مقدار روانی طبق دستورالعمل ASTM-D1559 برای تمام نمونه‌های ساخته شده تعیین گردید.

### ۳-۳. کشش غیر مستقیم

برای اندازه‌گیری مقاومت کششی غیر مستقیم ( $ITS^1$ ) نمونه‌ها طبق ترکیب‌های ارائه شده در جدول ۴ و با قیر بهینه ساخته شده و نتایج به‌دست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ASHTTO-T283 به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه قرار گرفتند. پس از آن آزمایش  $ITS$  انجام شد. در این آزمایش، مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌گردد (AASHTO، ۱۹۹۵):

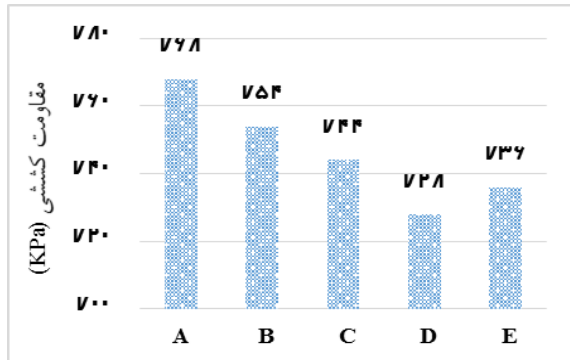
$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (1)$$

که  $P$  مقدار بار،  $t$  ضخامت،  $D$  قطر نمونه و  $S_t$  مقاومت کششی (Kpa) می‌باشد.

2- Marshal stability ratio  
3 - Tensile strength ratio

1- Indirect tensile strength

کمترین مقدار مربوط به نمونه D و بیشترین مقدار مربوط به نمونه A می‌باشد.



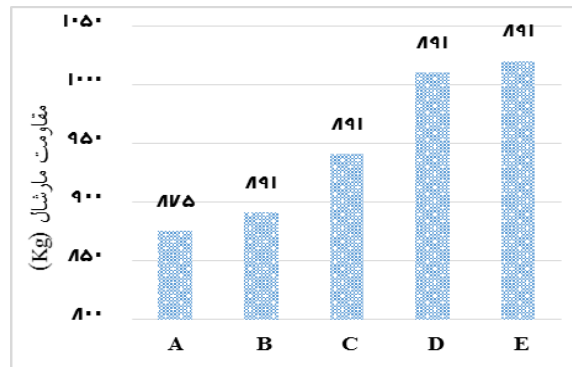
شکل ۴. نمودار تغییرات مقاومت کششی در حالت خشک در درصدهای مختلف CWP

در شکل ۵ تغییرات پارامترهای نسبت مارشال اشباع به خشک (MSR) و نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک (TSR) نشان داده شده است. مطابق شکل، MSR نمونه‌های مورد آزمایش بیشتر از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه (۰.۷۵٪) می‌باشد. مطابق شکل، نمونه‌های حاوی ترکیب LM و CWP نسبت مارشال بالاتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته‌اند. برای نمونه‌های B و C به ترتیب نسبت مارشال بزرگ‌تر و برابر یک بوده است. مطابق جدول ۳، اکسید سیلیسیوم و اکسید آلومینیم موجود در CWP در حضور آب با اکسید سیلیسیوم موجود در سنگ آهک 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. این مسئله کم و بیش در مورد نسبت TSR نیز صادق است. اگر چه نسبت TSR تمامی نمونه‌ها بیشتر از حداقل مقدار تعیین شده در آیین‌نامه (۰.۸۰٪) می‌باشد اما مخلوط‌های ساخته شده با ترکیب هر دو افزودنی مقادیر بالاتری به دست داده‌اند.

که  $M_d$  مقاومت مارشال در شرایط خشک،  $M_s$  مقاومت مارشال در شرایط مرطوب، MSR نسبت مقاومت مارشال اشباع به خشک،  $ITS_d$  و  $ITS_s$  به ترتیب مقاومت کششی غیر مستقیم خشک و اشباع و TSR نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک می‌باشند.

#### ۴. نتایج و بحث

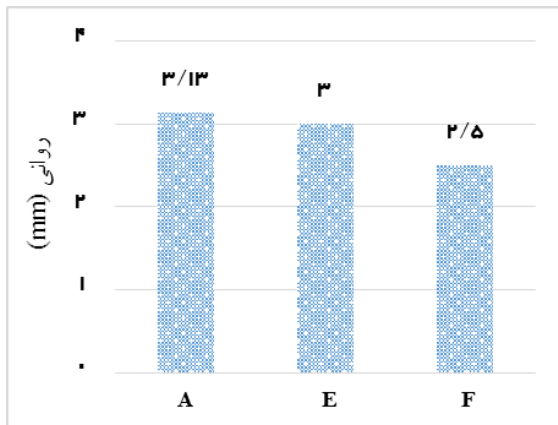
در شکل ۳ نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال برای ترکیب‌های مختلف مشاهده می‌شود. مطابق این شکل، محدوده مقاومت مارشال بین ۸۷۵ تا ۱۰۲۰ کیلوگرم بوده و برای تمام نمونه‌ها از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه برای ترافیک سنگین (۸۰۰ kg) بیشتر می‌باشد. همچنین، با افزایش درصد CWP در نمونه‌ها، مقاومت مارشال افزایش یافته است. بیشترین مقدار مقاومت مارشال مربوط به نمونه E که شامل ۱۰۰ درصد CWP بوده و کمترین مقدار مربوط به نمونه A که حاوی ۱۰۰ درصد فیلر سنگ آهک بوده، می‌باشد. با توجه به این نتایج، ترکیبات پوزولانی موجود در فیلر CWP که در جدول ۳ ارائه شده است اثر مفیدی بر میزان مقاومت و باربری مخلوط داشته‌اند.



شکل ۳. نمودار تغییرات مقاومت مارشال در حالت خشک در درصدهای مختلف CWP

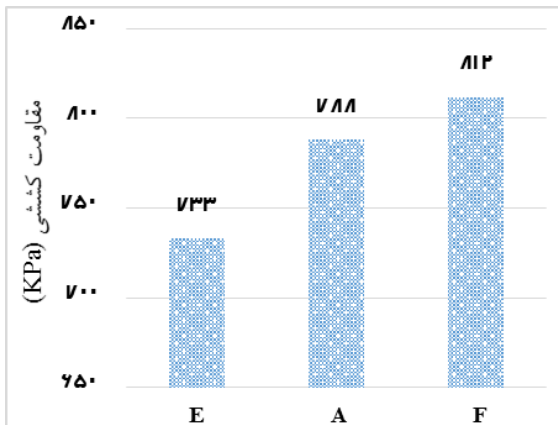
در شکل ۴، تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها برای ترکیب‌های مختلف بین ۷۲۸ تا ۷۶۸ کیلوپاسکال می‌باشد.

بجای فیلر سنگ آهک بوده است. نمونه F کمترین مقدار روانی را در بین سه فیلر دارا می‌باشد، که بیانگر تغییر شکل کمتر و اصطکاک داخلی بیشتر ذرات تشکیل دهنده آن است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مقادیر برای تمامی فیلرها در محدوده استاندارد آیین نامه (۲ تا ۴ میلی‌متر) قرار دارند.



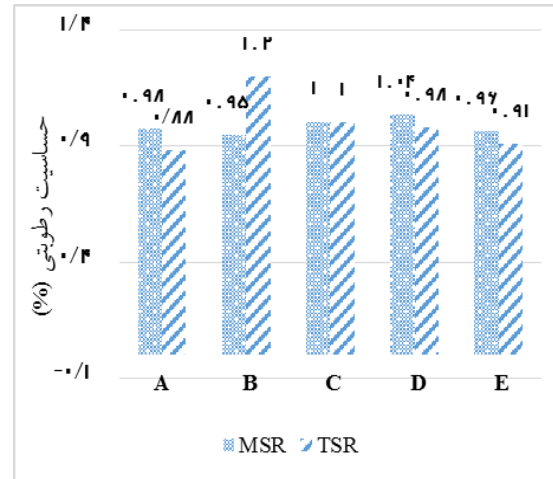
شکل ۷. مقایسه روانی سه فیلر CWA و LM و CWP

در شکل ۸، مقادیر مقاومت کششی به دست آمده از سه فیلر مورد تحقیق با هم مقایسه شده است. مطابق شکل، نمونه F بیشترین مقاومت و بعد از آن نمونه A و E قرار داشته‌اند. این نتایج مطابق نتایج قبلی حاکی از آن است که مقاومت کششی فیلر CWP در حالت خام کمتر از LM بوده اما نتایج آن قابل قبول می‌باشد. CWA به دلیل حذف کربن نسوخته و افزایش نسبت ترکیبات پوزولانی مطابق جدول ۳، مقاومت بالاتری در بین سه فیلر دارا می‌باشد.



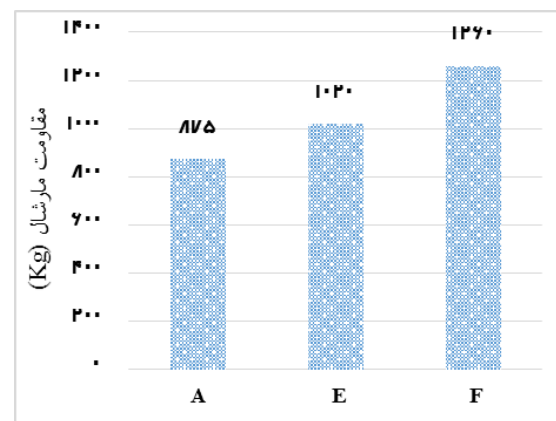
شکل ۸. مقایسه مقاومت کششی خشک سه فیلر CWP،

CWA و LM



شکل ۵. نمودار تغییرات نسبت مقاومت کششی و مارشال در حالت اشباع به خشک

در شکل ۶ نتایج آزمایش استقامت مارشال برای سه فیلر LM، CWP و CWA مقایسه شده است. مطابق شکل، بهترین مقدار مقاومت برای نمونه حاوی خاکستر زغال سنگ ضایعاتی به دست آمده است. به هر حال مخلوط‌های حاوی CWP و CWA مقاومت بالاتری را نسبت به مخلوط حاوی پودر سنگ آهک کسب نموده‌اند. مطابق جدول ۳، مقدار ترکیبات پوزولانی بالاتری نسبت به CWP داشته و این مسئله باعث افزایش مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی این فیلر شده است.



شکل ۶. مقایسه مقاومت مارشال خشک سه فیلر CWP،

CWA و LM

شکل ۷، مقدار روانی به دست آمده از سه فیلر مختلف مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از کاهش مقدار روانی با جایگزینی فیلر زغال سنگ ضایعاتی و خاکستر آن



آلودگی‌هایی به همراه دارد، در نهایت، بر اساس تحلیل- های انجام شده، استفاده از پودر زغال‌سنگ ضایعاتی در حالت خام به عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالت گرم توصیه می‌شود.

## ۵. نتایج

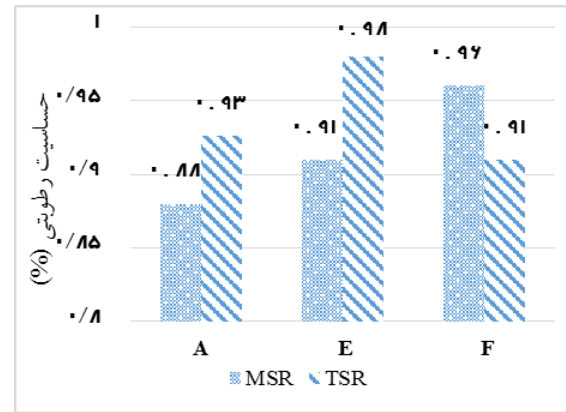
در این تحقیق، امکان استفاده از فیلر زغال‌سنگ ضایعاتی در مخلوط آسفالت گرم با انجام آزمایش‌هایی مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تعیین قیر بهینه به میزان ۵/۲ درصد، پودر زغال‌سنگ ضایعاتی به‌عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم به تنهایی و به‌همراه سنگ آهک در ۵٪ (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی فیلر) مورد استفاده قرار گرفت. بعد از سوزاندن پودر زغال‌سنگ ضایعاتی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و تبدیل به خاکستر، این ماده نیز به‌عنوان فیلر در مخلوط استفاده شد و نتایج به دست آمده با هم مقایسه گردید. مهمترین نتایج به‌دست آمده از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱- مقاومت مارشال مخلوط حاوی ۱۰۰٪ پودر زغال‌سنگ ضایعاتی دارای بهترین عملکرد بوده و نمونه شاهد (۱۰۰٪ سنگ آهک) دارای کمترین مقدار مقاومت مارشال می‌باشد. همچنین، با افزایش درصد پودر زغال‌سنگ ضایعاتی مقدار مقاومت مارشال نیز افزایش می‌یابد.

۲- مقاومت کششی مخلوط آسفالتی حاوی ۲۵٪ فیلر زغال‌سنگ ضایعاتی و ۷۵٪ سنگ آهک بهترین عملکرد را بین نمونه‌ها داشته و مخلوط حاوی ۷۵٪ فیلر زغال‌سنگ ضایعاتی و ۲۵٪ سنگ آهک کمترین مقدار مقاومت کششی را دارا می‌باشد.

۳- تمامی نمونه‌های حاوی پودر زغال‌سنگ ضایعاتی در آزمایش دوام TSR معیار آئین‌نامه (بیشتر از ۸۰٪) و دوام MSR حد نصاب (بیشتر از ۷۵٪) را تأمین نموده‌اند. بیشترین مقدار دوام TSR برای مخلوط حاوی ۷۵٪ پودر زغال‌سنگ ضایعاتی و ۲۵٪ سنگ آهک می‌باشد و بیشترین مقدار دوام MSR برای مخلوط حاوی ۲۵٪ پودر زغال‌سنگ ضایعاتی و ۷۵٪ سنگ آهک می‌باشد.

در شکل ۹، نتایج مقادیر MSR و TSR برای سه فیلر مقایسه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، فیلر زغال‌سنگ در حالت خام و خاکستر مقادیر بیشتری نسبت به سنگ آهک داشته است.



شکل ۹- مقایسه MSR و TSR سه فیلر CWP، LM و CWA

بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، فیلر زغال‌سنگ ضایعاتی می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سنگ آهک پیشنهاد شود. مهمترین معضل موجود در این ماده بالا بودن درصد کربن نسوخته یا L.O.I است که می‌تواند در صورت خمیری بودن ماده باعث مشکلات دوام گردد. اما همانطور که در متن مقاله ذکر شد، بر اساس آزمایش انجام شده روی زغال‌سنگ ضایعاتی، 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 سنگ آهک مقادیر MSR و TSR بیشتری هم داشته است. همچنین، خاکستر این ماده به دلیل حذف بخش زیادی از 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. با توجه به آنکه فرایند تبدیل ضایعات زغال‌سنگ به خاکستر هزینه‌های اضافی به پروژه تحمیل نموده و

۷- نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک فیلر زغال سنگ ضایعاتی با ۰/۹۸٪ بهترین عملکرد را داشته و سنگ آهک و خاکستر زغال سنگ ضایعاتی با ۰/۹۲۶ و ۰/۹۱ درصد دارای جایگاه بعدی می باشند.

۸- با توجه به آزمایش های انجام شده، به عنوان یک نتیجه گیری کلی می توان بیان داشت که استفاده از زغال سنگ ضایعاتی خام علاوه بر اینکه باعث صرفه جویی اقتصادی و کاهش مشکلات زیست محیطی می شود می تواند به عنوان جایگزین کامل یا بخشی از فیلر در مخلوط آسفالتی گرم پیشنهاد شود. همچنین، خاکستر زغال سنگ طبیعی به دلیل کاهش درصد کربن نسوخته و افزایش خاصیت پوزولانی دارای عملکرد بهتری نسبت به حالت خام آن می باشد. ولی به علت افزایش هزینه و مشکلات زیست محیطی، استفاده در حالت خام آن توصیه می گردد.

همچنین، مقایسه آزمایش های انجام شده روی سه فیلر زغال سنگ ضایعاتی، خاکستر آن و سنگ آهک نشان می دهد که:

۴- خاکستر زغال سنگ ضایعاتی در بین سه فیلر از نظر مقاومت مارشال بهترین عملکرد را داشته و بعد از آن زغال سنگ ضایعاتی عملکرد بهتری نسبت به سنگ آهک دارا می باشد.

۵- حداکثر روانی در بین سه فیلر مربوط به فیلر سنگ آهک و حداقل روانی مربوط به خاکستر زغال سنگ ضایعاتی می باشد که بیانگر تغییر شکل کمتر و اصطکاک داخلی بیشتر آن نسبت به فیلرهای دیگر است.

۶- مقاومت کششی خاکستر زغال سنگ ضایعاتی بیشترین مقدار و زغال سنگ ضایعاتی کمترین مقدار مقاومت را در در بین سه فیلر دارا می باشد.

## ۶. مراجع

- ادیبی، ن، اصانلو، م. و رحمان پور، م. ۱۳۹۱. "بررسی اثرات زیست محیطی دامپ های باطله معادن زغال سنگ کارمزد". اولین کنگره ملی زغال سنگ.
- AASHTO T 283, 1995, "Standard Test Method for the Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage", AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials, Part II, Washington, D.C.
- 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.
- Chen, M., Lin, J. and Wu, Sh. 2011. "Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture". Constr. Build. Mater. 25: 3909-3914.
- 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.
- Gardiner, M. S. 2009. "Laboratory Test for Assessing Moisture Damage of Asphalt Concrete Mixture". TRR No. 1353, pp. 15-23.
- 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, USA.
- Katamine, N. M. 2006. "Phosphate waste in mixtures to improve their deformation". J. Trans. Eng. 126: 382-391.
- Kezhen, Y. Hong-bin Xu, Heng-long Zhang. 2013. "Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing sasobit". Constr. Build. Mater. 48: 622-627.
- Laskowski, J. S. 2001. "Coal Flotation and Fine Coal Utilization". Department of Mining and Mineral Process Engineering.
- Lee, S. T. 2009. "Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack". Waste Manage. 29(8): 2385-2391.
- 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.
- 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.

- Muniandy, R. Eltaher Aburkaba, Lamya Mahdi. 2013. "Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements". *TJER* 10(2): 13-32.
- Rossi dos Santos, C. Cassiano Rossi dos Santos, Juarez Ramos do Amaral Filho, Daniel Pagnussat. 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., 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.
- 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.
- Skarkynska, K. M. 1995. "Reuse of coal mining wastes in civil engineering- part 2: Utilization of minestone". *Waste Manage.* 15(2): 83-126.
- Terzi, S. 2012. "Investigation of usability of steel fibers in asphalt concrete mixture". *Constr. Build. Mater.* 36: 238-244.
- Thanaya, I. N. A. and Forth, J. P. 2006. "Utilization 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.
- Yilmaz, M. Baha Vural Kök, Necati Kuloğlu. 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.