

# استفاده از پودر ضایعات زغال سنگ و آهک در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون

امیر مدرس (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران  
پویان ایار، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

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

دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۰ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۱۹

## چکیده:

در این پژوهش از پودر باطله زغال سنگ، به صورت طبیعی و خاکستر به عنوان افزودنی در مخلوط بازیافت شده با قیرامولسیون استفاده شد. همچنین پودر آهک نیز به صورت جداگانه و ترکیبی در مخلوط بازیافت شده بکار رفت. عملکرد مخلوط‌های مورد مطالعه به وسیله آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی ارزیابی شد. نتایج ارزیابی‌های آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از باطله زغال سنگ و خاکستر آن سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط می‌شود، به طوری که استقامت مارشال، مقاومت کششی و مدول برجهندگی مخلوط افزایش می‌یابد. البته اثرات استفاده از خاکستر باطله زغال سنگ بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط با توجه به وجود مواد پوزولانی بیشتر در ترکیب شیمیایی آن، مشهودتر است. افزون بر این استفاده از خاکستر باطله زغال سنگ توانست حساسیت رطوبتی مخلوط بازیافت شده را کاهش دهد، در حالی که بکارگیری باطله زغال سنگ سبب افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط شد. نتایج نشان داد افزودن ۳ درصد آهک به مخلوط بازیافت شده حساسیت رطوبتی را به صورت چشمگیری کاهش می‌دهد. همچنین از آهک می‌توان به عنوان مکملی برای باطله زغال سنگ و خاکستر آن استفاده کرد، زیرا نتایج نشان داد که در اثر وقوع واکنش‌های سیمانی مخصوصاً در درازمدت، ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی بازیافت شده، قیرامولسیون، باطله زغال سنگ، خاکستر باطله زغال سنگ، آهک

## ۱. مقدمه

روش‌های گوناگونی برای بهسازی روسازی‌های بتن‌آسفالتی وجود دارد. یکی از این روش‌ها بازیافت سرد است. این روش بهسازی با بهره‌گیری از مصالح موجود و بدون اعمال حرارت انجام می‌گیرد [Suleiman, 2002]. استفاده از مصالح خرده‌آسفالتی در این روش باعث کاهش مصرف سنگدانه‌های طبیعی و قیر در مخلوط می‌شود و از سوی دیگر از انباشت ضایعات جلوگیری می‌کند. بنابراین امروزه بازیافت سرد روسازی‌های بتن‌آسفالتی به دلایل فنی، اقتصادی و زیست محیطی، روشی با ارزش محسوب شده و می‌تواند جایگزین روش‌های سنتی ترمیم روسازی باشد [Ameri and Behnood, 2012, Martínez-Echevarría et al., 2012]. تحقیقات قبلی نشان می‌دهند که افزودنی‌هایی مانند کف قیر، قیر امولسیون، خاکستر بادی، سیمان و آهک عملکرد مخلوط بازیافت‌شده را بهبود می‌بخشند [Xiangguo et al., 2013]. با توجه به استفاده از باطله زغال‌سنگ در این تحقیق، در ادامه نکاتی راجع به نحوه تولید، تبعات زیست محیطی و تجربیات استفاده از آن در صنعت ساخت ارائه شده است. استخراج و فرآوری زغال‌سنگ توأم با تولید حجم قابل ملاحظه‌ای از مواد ضایعاتی است. در خلال استخراج معادن زغال‌سنگ و فرآیندهای فرآوری زغال، باطله‌های درشت و ریز تولید و انباشت می‌شوند [Zhengfu et al., 2010, Doulati, 2011]. فرآوری زغال‌سنگ شامل فرآیندهای فیزیکی است که با مرتب‌کردن، دانه‌بندی و کاهش مواد معدنی موجود مانند خاکستر و گوگرد موجب ارتقاء کیفیت زغال‌سنگ می‌شود. روش فرآوری ثقلی به وسیله دستگاه پرعیارسازی ثقلی<sup>۱</sup> برای زغال‌های با اندازه متوسط و درشت و روش فلوتاسیون<sup>۲</sup> برای فرآوری زغال‌سنگ‌های ریز انجام می‌گیرد [Laskowski, 2001]. زهاب‌های اسیدی معدنی<sup>۳</sup> AMD به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده آب در مناطق معدنی به‌شمار می‌آید که حاوی سولفات

آهن و فلزات سنگین است [Doulati Ardejani et al., 2010]. مشکل آلاینده‌گی در معادن زغال‌سنگ عموماً ناشی از اکسیداسیون پیریت است. زمانی که پیریت و مواد حاوی آهن در معرض آب یا هوا و یا هردوی آن قرار گیرند، دستخوش اکسیداسیون سریع خواهند شد که منجر به تولید زهاب‌های اسیدی می‌شود. زهاب‌های خارج شده از دامپ‌های باطله<sup>۴</sup> تأثیرات مضر بر کیفیت آب دارند. افزون بر این AMD، با pH کم و داشتن مقادیر زیادی آهن، SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> و فلزات سمی تهدیدی برای اکوسیستم محسوب می‌شود [Doulati Ardejani et al., 2010, Ribeiro et al., 2012]. در یک پژوهش نتایج تحلیل‌های ژئوشیمیایی و معدنی همراه با شبیه‌سازی عددی ثابت کرد که در دامپ‌های باطله کارخانه زغال‌شویی رازی منطقه آزادشهر-رامیان واقع در شمال ایران، اکسیداسیون پیریت رخ داده و کیفیت آب‌های سطحی را تحت تأثیر قرار داده است [Doulati Ardejani et al., 2010]. این مسئله هشدار برای توجه به حفظ محیط‌زیست در جوار کارخانه‌های زغال‌شوی در ایران است. با افزایش استخراج زغال‌سنگ در ایران به منظور تامین انرژی صنعت فولاد، حجم باطله‌های زغال‌سنگ در اطراف معادن و کارخانه‌های زغال‌شویی افزایش یافته است. محققان معتقدند دامپ‌های باطله زغال‌سنگ به‌عنوان یکی از منابع آلاینده آب‌های زیرزمینی در درازمدت تلقی می‌گردد. بازسازی دامپ‌های باطله زغال‌سنگ یکی از راه‌های کاهش اثرات مخرب زیست محیطی آن‌ها است [Szczepanska and Twardowska, 1999]. به‌عنوان مثال در جوار کارخانه زغال‌شویی البرز مرکزی در شمال ایران تعدادی دامپ باطله با حجم بسیار زیاد مشاهده می‌شود [Shahhoseiny et al., 2013]. از سوی دیگر با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی مرطوب در شمال ایران احتمالاً روند اکسیداسیون پیریت نیز سریع‌تر است. بنابراین بهتر است حجم ضایعات انباشت‌شده در طبیعت کاهش یابد. یکی از راه‌حل‌های مشکلات زیست محیطی دامپ‌های باطله

## ۲. استفاده از افزودنیها در بازیافت سرد آسفالت

مطالعات قبلی نشان می‌دهد که لایه‌های روسازی بازیافت شده با روش سرد، معمولاً با مشکلاتی نظیر شن زدگی، ترک‌های حرارتی، شیارشدگی، عریان‌شدگی، مقاومت اولیه کم و زمان عمل‌آوری طولانی مواجه شده‌اند. از سوی دیگر نتایج تحقیقات دیگری بیان‌گر آن است که استفاده از افزودنی‌ها می‌تواند باعث بهبود عملکرد مخلوط بازیافتی شود [Niazi and Jalili, 2009]. عملکرد بهتر روسازی‌های بازیافتی با انتخاب صحیح نوع افزودنی، حاصل خواهد شد. معمولاً برای بهبود فرآیند اجرای بازیافت سرد آسفالت، ارتقای ویژگیهای تغییرشکلی بویژه در زمان‌های اولیه ساخت، تسریع در گیرش مخلوط، کاهش زمان عمل‌آوری، افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه، پخش شدن یکنواخت قیر، کاهش خاصیت خمیری مصالح، پیشگیری از وقوع خرابی‌های زودرس، از افزودنیهای مختلفی استفاده شده‌است. در انتخاب افزودنی باید ویژگی‌های مصالح خرده‌آسفالتی، در دسترس بودن، هزینه، عملکرد و شرایط آب و هوایی مورد توجه قرار گیرد [Suleiman, 2002, Iowa Highway Research Board, 2003, Wirtgen, 2012]. استفاده از افزودنی‌ها باعث بالا رفتن هزینه‌های ساخت می‌شود. برای نمونه، در عملیات بازیافت اگر تنها از آب استفاده شود (برای کمک به متراکم نمودن مخلوط) بسیار ارزان‌تر از استفاده از قیرامولسیون است. از سوی دیگر، اگر منافع حاصل از استفاده صحیح از افزودنی‌ها یعنی عمر بیشتر روسازی مد نظر قرار گیرد، بکار بردن آنها توجیه پذیر خواهد بود. بنابراین بایستی منافع حاصل از افزودنی‌ها در بهبود عمر روسازی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد [Iowa Highway Research Board, 2003]. آهک به‌عنوان یکی از رایج‌ترین افزودنی‌ها در مخلوط‌های بازیافتی به‌روش سرد استفاده می‌شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از دوغاب آهک همراه با قیر امولسیون باعث

امکان‌سنجی استفاده از آن در صنایع مختلف از جمله صنعت راهسازی است. محققان باطله زغال سنگ را در تثبیت اساس و زیراساس راه مورد استفاده قرار دادند که نتایج حاصل از این پژوهش نشان از افزایش مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه داشته است [Kinuthia and Nidzam, 2009]. همچنین در مطالعه دیگری، باطله زغال سنگ به‌عنوان ریزدانه در ساخت بتن روسازی‌های بلوکی مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق باطله زغال سنگ در ۵ درصد وزنی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین ماسه در بتن بلوکی شد و مقاومت فشاری در ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. با جایگزینی ۲۵ تا ۵۰ درصد باطله زغال سنگ بجای سنگدانه‌های ریزدانه، نتایج رضایت‌بخشی از نظر مقاومت مکانیکی حاصل می‌شود. با استفاده از باطله زغال سنگ در مصرف ماسه صرفه‌جویی شده و حجم پسماندهای دپوشده کاهش می‌یابد [Santos et al., 2013]. نتایج تحقیقات دیگری نشان داد جایگزینی باطله زغال سنگ به‌عنوان بخشی از سیمان در مخلوط سیمانی به میزان ۲۰٪ مقاومت فشاری ۷ روزه را افزایش داده ولی مقاومت ۹۰ روزه را کاهش می‌دهد [Frias et al. 2012]. تاکنون از باطله زغال سنگ به‌صورت پودر و یا سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت شده استفاده نشده‌است. تجربیات استفاده از باطله زغال سنگ به‌صورت سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی گرم به سال ۱۹۶۴ در ایالات متحده بر می‌گردد. این تجربیات نشان دادند بکارگیری باطله زغال سنگ به‌عنوان سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی گرم توانست رویه‌ای آسفالتی با مقاومت لغزشی مناسب ایجاد کند. همچنین اگرچه ویژگی‌های مکانیکی مخلوط حاوی سنگدانه باطله زغال سنگ رضایت‌بخش بود، اما عدم پوشش مناسب با قیر و کاهش دوام مخلوط تمایل به استفاده از این نوع ضایعات را کاهش داد، به‌طوری که تحقیقات جدیدی در این خصوص انجام نگرفته است. [Kandhal, 1992]

ضایعاتی مانند خاکستربادی، انجام گرفت. لازم به ذکر است که تاکنون استاندارد خاصی به منظور تعیین مقدار خاکستربادی در مخلوط‌های بازیافتی معرفی نشده است [ARRA, 2001]. خاکستر بادی معمولاً به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط‌های بازیافتی استفاده می‌شود [Xiangguo et al. 2013]. برخی از ادارات ابلتی راه آمریکا از خاکستر بادی به عنوان افزودنی در مخلوط‌های بازیافتی به منظور افزایش مقاومت اولیه، مقاومت در برابر شیارشدگی و آسیب‌های رطوبتی استفاده کرده‌اند. همچنین در یک مقایسه اقتصادی مشخص شد که استفاده از آهک ۲۵٪ گران‌تر از استفاده از خاکستر بادی است [Fager, 2004]. نتایج ارزیابی میدانی قطعه‌ای از روسازی بتن آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون همراه با بکارگیری خاکستربادی به عنوان افزودنی، نشان داد ظرفیت سازه‌ای بعد از یکسال بهره‌برداری ۴۹٪ افزایش یافت. همچنین در طول یکسال بهره‌برداری هیچگونه خرابی مشاهده نشد. در ساخت لایه یازافت‌شده از قیرامولسیون (با نرخ پخش ۷ لیتر بر مترمربع) و ۷٪ خاکستربادی استفاده شده بود [Benson et al. 2009]. استفاده از یک نوع افزودنی که از ضایعاتی، باعث بهبود چشمگیر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی سرد در مقایسه با مخلوط آسفالتی گرم شد. به طوری که جایگزینی ۵۰ درصد فیلر معمولی با این افزودنی مدول سختی مخلوط سرد را افزایش داد [Al-Busaltan et al. 2012].

### ۳. اهداف تحقیق

با توجه به حجم بسیار زیاد ضایعات ناشی از فرآوری زغال‌سنگ در جوار معادن و کارخانه‌های زغال‌شویی و آلاینده‌های جدی زیست محیطی ناشی از انباشت آنها، امکان‌سنجی استفاده از این ضایعات در صنایع مختلف از جمله صنعت ساخت و ساز حائز اهمیت است. استفاده از این ضایعات باعث کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی می‌شود و همچنین گام مهمی در راستای حفظ

افزایش محسوس مقاومت اولیه و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط بازیافت‌شده می‌شود [Cuelho et al. 2006]. همچنین دوغاب‌آهک بسیار مؤثرتر از پودرآهک در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط بازیافتی عمل می‌کند [Niazi and Jali, 2009]. در پژوهشی دیگر نشان داده شد که استفاده از دوغاب آهک هیدراته به طور قابل توجهی سختی مخلوط را در تمامی دماها و فرکانس‌ها افزایش می‌دهد [Cross and Jakatimath, 2007].

سیمان نیز در مخلوط‌های بازیافتی به عنوان افزودنی به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود. تاکنون تحقیقات متعددی درباره تأثیرات استفاده از سیمان در مخلوط‌های بازیافتی انجام شده است. استفاده از سیمان باعث افزایش چشمگیر سختی اولیه، کاهش تغییرشکل‌های ماندگار و بهبود دوام مخلوط بازیافتی می‌شود [Kavussi and Modarres, 2010]. سختی به دست آمده به علت عملکرد سیمان به عنوان یک چسبنده قوی است [Niazi and Jalili, 2009, Xiao and Yu, 2011]. این نکته حائز اهمیت است که استفاده بیشتر از ۱٪ سیمان به منظور افزایش دوام مخلوط بازیافتی مقرون به صرفه نیست [Xiao and Yu, 2011]. همچنین تحقیقات دیگر نشان می‌دهند که هر چند استفاده از مواد پوزولانی مانند سیمان باعث کاهش انعطاف‌پذیری لایه‌های بازیافتی می‌شود، اما از وقوع تغییرشکل‌های بیش از حد در طی فازهای اولیه عمل‌آوری جلوگیری می‌کند [Mallick et al., 2002].

از سوی دیگر فرآیند تولید افزودنی‌های رایج مانند سیمان، تأثیرات مخربی بر محیط زیست دارد. در تمام مراحل تولید سیمان مواد آلاینده مختلف انتشار می‌یابد که مهم‌ترین آنها  $SO_2$ ،  $NO_x$  و  $CO_2$  هستند [Paoli et al., 2014]. به علت آلاینده‌های زیست‌محیطی در خلال فرآیندهای تولید سیمان و همچنین افزایش هزینه‌ها، تحقیقاتی در رابطه با استفاده از افزودنی‌های

## استفاده از پودر ضایعات زغال‌سنگ و آهک در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت‌شده با قیرامولسیون

جدول ۱ استنتاج می‌شود یعنی کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته، نشان‌دهنده پیرشدگی قیر پس از بهره‌برداری از روسازی است. قیر مانند سایر مواد آلی با گذشت زمان تکامل پیدا می‌کند که این پدیده را پیری قیر گویند [Zhang et al. 2012]. روسازی بتن آسفالتی در معرض شرایط محیطی مانند دما، رطوبت، اکسیداسیون و بارگذاری مکانیکی است. این شرایط محیطی تأثیر مهمی بر ویژگی‌های مکانیکی و عمر بهره‌برداری روسازی دارند. واکنش شیمیایی بین اکسیژن و قیر در فصل مشترک قیر و سنگدانه را پیرشدگی در اثر اکسیداسیون گویند. البته عامل دیگری که باعث پیرشدن قیر می‌شود، تابش اشعه فرابنفش است [Abu Al-Rub et al. 2013]. با توجه به حجم اندک عبور وسایل نقلیه در دوران بهره‌برداری، سایر عوامل مانند دما، رطوبت، اکسیداسیون و اشعه فرابنفش در پیرشدن قیر نقش مهمی داشته‌اند. همچنین نباید تأثیر پیرشدگی اولیه در اثر عملیات ساخت مخلوط در کارخانه آسفالت را نادیده گرفت. در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی آسفالت در زمان اجرا، مصالح خرده‌آسفالتی و دانه‌بندی مصالح پس از استخراج قیر ترسیم شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل تراش آسفالت دانه‌بندی مصالح خرده‌آسفالتی نسبت به دانه‌بندی اولیه متفاوت است. ویژگی‌های مصالح خرده‌آسفالتی نیز در جدول ۲ ارائه شده‌است.

### ۴-۲ آب

کیفیت آب مورد استفاده در مخلوط بازیافتی سرد باید بررسی شود [Wirtgen, 2012]. زیرا احتمال دارد برخی از ترکیبات آب باعث تغییر در سرعت انجام واکنش‌های شیمیایی درون مخلوط

محیط‌زیست خواهد بود. هدف اصلی از این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از باطله زغال‌سنگ به صورت مصالح ریزتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر (پودر) و بررسی تاثیر آن بر ویژگی‌های مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های بازیافت‌شده با قیرامولسیون است. به همین منظور از آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم، حساسیت رطوبتی و مدول برجهنگی برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های مورد مطالعه استفاده شد. همچنین از پودر آهک نیز جداگانه و به صورت ترکیبی با ضایعات زغال‌سنگ در مخلوط بازیافت‌شده استفاده شد. هدف اصلی استفاده از آهک به صورت ترکیبی با ضایعات زغال‌سنگ و خاکستر آن، جبران کمبود ترکیبات آهکی در ترکیب شیمیایی این نوع ضایعات است.

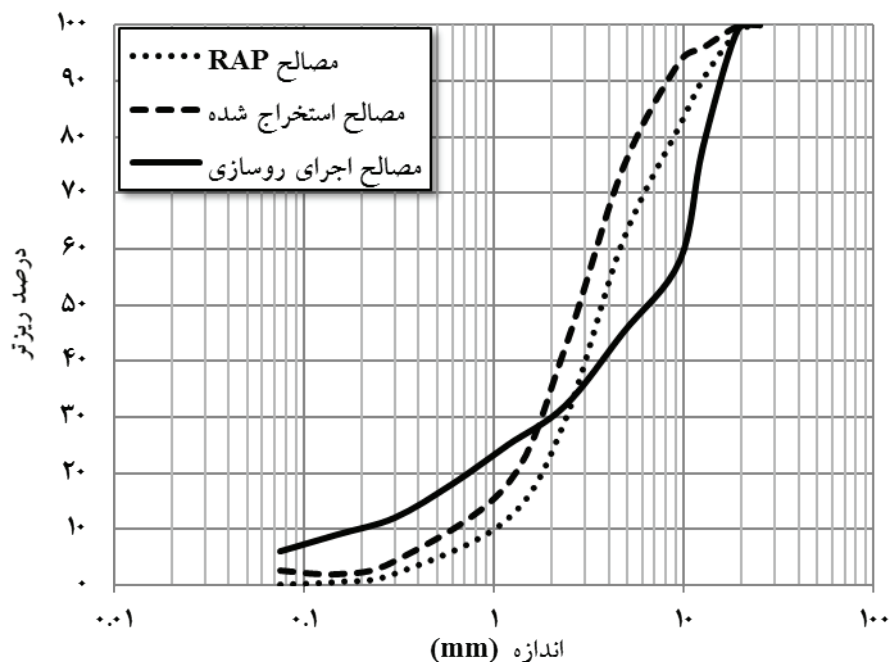
## ۴. مصالح و افزودنی‌ها

### ۴-۱ خرده‌آسفالت °RAP

مصالح خرده‌آسفالتی مورد نیاز از محل عملیات ترمیم روسازی کمربندی شرقی شهر ایلام تهیه شد. لازم به ذکر است، که از خرده‌آسفالت حاصل از تراش لایه آستر (بیندر) استفاده شد. عملیات تراش توسط دستگاه آسفالت‌تراش به عمق ۵ سانتی‌متر انجام شد. بر اساس نتیجه آزمایش استخراج قیر به روش ASTM D2172، درصد قیر موجود در مصالح خرده‌آسفالتی برابر ۴/۳ تعیین شد. همچنین در ساخت این روسازی از قیر ۶۰/۷۰ استفاده شده بود. ویژگی‌های قیر استفاده‌شده در اجرای روسازی (قیر اصلی) و مشخصات قیر بازیافتی شده مصالح خرده‌آسفالت نیز طبق روش آشتو ASTM D1856 در جدول ۱ مشاهده می‌شود. آنچه که از

جدول ۱. ویژگی‌های قیر استفاده شده در اجرای روسازی و مشخصات قیر بازیافتی شده

مشخصات	روش آزمایش	قیر اصلی	قیر بازیافتی شده	حد رواداری نشریه ۲۳۴
درجه نفوذ در ۲۵ °C (برحسب ۰/۱ میلیمتر)	ASTM D5	۶۹	۳۲	۶۰-۷۰
نقطه نرمی (°C)	ASTM D36	۴۹/۲	۶۳/۴	۴۹-۵۶
قابلیت کشش در ۲۵ °C برحسب سانتیمتر	ASTM D113	>۱۰۰	۳۹	>۱۰۰
کندروانی کینماتیکی (۱۳۵ °C) برحسب سانتی‌استوکس	ASTM D2170	۳۳۲	۸۷۱	-



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ساخت روسازی، خرده‌آسفالت و مصالح استخراج‌شده

جدول ۲. مشخصات مصالح خرده‌آسفالتی

مشخصه	استاندارد	مقدار (%)	حد رواداری نشریه ۳۳۹ برحسب (%)
ارزش ماسه ای	ASTM D2419	۸۲	حداقل ۳۵
افت وزنی با سولفات سدیم در ۵ سیکل	ASTM C88	۰/۵۴	حداکثر ۱۲
جذب آب	ASTM C127	۲/۸	حداکثر ۳
نشانه خمیری	ASTM D4318	N.P	حداکثر ۶
شکستگی	ASTM D5821	۶۸	حداقل ۵۰

پودر باطله زغال‌سنگ با توجه به کم بودن مقدار آهک CaO در ترکیب شیمیایی آن و نزدیک کردن خصوصیات آن به مواد سیمانی استفاده شد. [Han, 1995] در جدول ۴ آنالیز شیمیایی آهک به وسیله آزمایش XRF مطابق روش ASTM E1621 ارائه شده‌است.

#### ۴-۵ باطله زغال‌سنگ

باطله زغال‌سنگ از محل دامپ‌های موجود در کارخانه زغال‌شویی البرز مرکزی مازنداران تهیه شد. این ضایعات ناشی از فرآیند فرآوری توسط دستگاه پری‌ارسازی ثقلی هستند. تفاوت‌های اساسی این ضایعات با مواد سیمانی، مقدار بالای افت ناشی از

شود. در این بررسی از آب شرب با pH برابر با ۸ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد.

#### ۴-۳ قیر امولسیون

در این پژوهش از قیر امولسیون کاتیونیک دیرشکن CSS-1h استفاده شد. ویژگی‌ها و ترکیبات قیرامولسیون در جدول ۳ ارائه شده‌است.

#### ۴-۴ آهک

در این تحقیق از آهک به‌عنوان یک افزودنی رایج در بازیافت سرد آسفالت استفاده شد. همچنین از آهک به‌عنوان مکملی برای

استفاده از پودر ضایعات زغال سنگ و آهک در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون

جدول ۳. ویژگی و ترکیبات قیرامولسیون

مشخصه	مقدار	حد رواداری نشریه ۲۳۴
کندروانی سی بولت فیورول در ۲۵ درجه سانتیگراد (ثانیه)	۴۰	۱۰۰-۲۰
قابلیت اندود مصالح سنگی	خوب	-
بار ذره ای دانه‌های قیر	مثبت	مثبت
مقدار قیر خالص (%)	۶۰	-
مقدار آب (%)	۳۵	-
مقدار امولسیون ساز (%)	۱	-
حلال (%)	۳/۵	-
اسید کلریدریک (%)	۰/۵	-

جدول ۴. آنالیز شیمیایی آهک

ترکیبات	درصد
L.O.I.	۵/۶۴
MgO	۲/۴۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۷
SiO <sub>2</sub>	۰/۶۲
SO <sub>3</sub>	۰/۳۹
K <sub>2</sub> O	<۰/۰۱
CaO	۹۰/۵۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۷

معدنی مانند زغال سنگ (کربن) استفاده می‌شود. در این آزمایش ماده معدنی در دمای ثابت و کنترل شده سوزانده می‌شود و این روند تا زمان ثابت شدن وزن آن ادامه می‌یابد. در این آزمایش ابتدا پودر باطله زغال سنگ در چهار دمای ۴۵۰، ۷۵۰، ۹۵۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شد. سپس مقدار L.O.I برای هر یک از خاکسترهای به دست آمده محاسبه شد. طبیعتاً مقدار L.O.I خاکسترهای ایجاد شده در دمای بالا کمتر است، زیرا مقدار بیشتری از کربن موجود سوزانده می‌شود. اما از آنجا که مقدار کاهش L.O.I برای خاکسترهای ایجاد شده در دمای بالای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ناچیز بوده و با توجه به ملاحظات زیست محیطی و انرژی، دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، برای سوزاندن باطله تعیین شد. مقدار افت ناشی از حرارت خاکستر در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۲٪ است. یعنی مقدار L.O.I باطله زغال سنگ پس از سوختن ۳۹٪ کاهش یافته است. مدت زمان سوزاندن به نوع و نحوه انتقال حرارت به مواد باطله وابسته است. طبیعتاً هرچه مواد در سطح گسترده‌تر و با ضخامت کمتر در معرض حرارت یکنواخت قرار گیرند، مدت زمان لازم برای سوزاندن زغال موجود در باطله کاهش می‌یابد. در این بررسی برای سوزاندن باطله زغال سنگ با توجه به ظرفیت حجمی محدود کوره‌های آزمایشگاهی، از کوره کارخانه نورد میلگرد استفاده شد. در شکل ۲ پودر باطله زغال سنگ

حرارت L.O.I<sup>۷</sup> به علت وجود زغال سنگ در آن و مقدار جزئی ترکیبات آهکی در آن هستند. این در حالی است که مقدار SiO<sub>2</sub> موجود در قیاس با مواد پوزولانی دیگر مناسب است. باطله زغال سنگ مورد استفاده در این پژوهش پس از خشک شدن کامل، به صورت مصالح ریزتر از ۰/۰۷۵ آماده شد. در جدول ۵ ترکیب شیمیایی باطله زغال سنگ و خاکستر آن که به وسیله آنالیز XRF به دست آمده، ارائه شده است.

#### ۴-۶ خاکستر باطله زغال سنگ

برای تعیین دمای سوزاندن باطله زغال سنگ، به منظور کاهش مقدار زغال سنگ موجود در آن، از آزمایش L.O.I استفاده شد. این آزمایش برای تعیین مقدار ترکیبات فرار موجود در مواد

جدول ۵. ترکیب شیمیایی باطله زغال سنگ و خاکستر آن

ترکیبات شیمیایی (%)	باطله زغال سنگ	خاکستر باطله زغال سنگ
<b>TiO<sub>2</sub></b>	۰/۹۸۳	۱/۶۳۴
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	۳/۸۹	۸/۰۹
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	۱۴/۵۳	۲۳/۲۵
<b>SiO<sub>2</sub></b>	۳۴/۸	۵۵/۶۳
<b>CaO</b>	۰/۵۱۳	۲/۲۸۲
<b>MgO</b>	۰/۸۶۸	۱/۵۴۱
<b>SO<sub>3</sub></b>	۰/۵۳	۰/۴۶
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	۰/۱۷	۰/۳۴
<b>K<sub>2</sub>O</b>	۲/۳۹۲۷	۳/۹۶۱۲
<b>MnO</b>	۰/۰۲	۰/۰۵
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	۰/۲۷	۰/۵۹
<b>Cr</b>	۰/۰۰۵۳	۰/۰۱۳
<b>V</b>	۰/۰۱۵۷	۰/۰۲۶۶
<b>As</b>	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۳۳
<b>Cl</b>	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۵۹
<b>Sr</b>	۰/۰۱۸۱	۰/۰۴۵۳
<b>Zr</b>	-	۰/۰۲۱۸
<b>L.O.I</b>	۴۱/۰۳	۲/۰۱

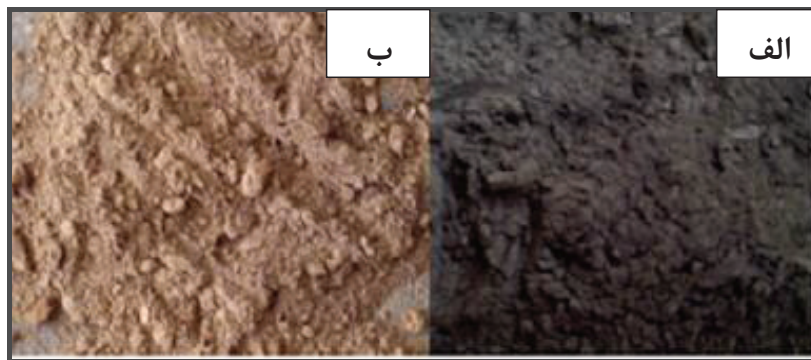
و خاکستر آن نشان داده شده است. اگر ترکیب شیمیایی خاکستر باطله زغال سنگ که در جدول ۵ ارائه شده است را با معیارهای طبقه بندی خاکستر بادی طبق استاندارد ASTM C 618 مقایسه شود، ملاحظه خواهد شد که از نظر ترکیبات شیمیایی به خاکستر بادی نوع N یا F شبیه است. زیرا مجموع ترکیبات  $Fe_2O_3$ ،  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  بیشتر از ۷۰٪ و شاخص L.O.I آن حدود ۲٪ است.

### ۵. طرح اختلاط

روش های متعددی برای تعیین مقدار قیرامولسیون و رطوبت بهینه در مخلوط بازیافت شده با روش سرد وجود دارد [Kavussi and Modarres, 2010, Ameri and Behnood, 2012]. در این پژوهش از روش مارشال اصلاح شده برای طرح اختلاط استفاده شد. طبق این روش مصالح خرد آسفالتی با مقادیر مختلفی از

قیرامولسیون مخلوط شد. براساس پیشنهاد این روش در مرحله تعیین درصد قیرامولسیون بهینه، درصد رطوبت کل موجود در مخلوط های مختلف برابر ۳٪ است. این مقدار رطوبت برابر با مجموع آب موجود در قیرامولسیون، رطوبت موجود در مصالح خرد آسفالت (برابر ۰/۵٪) و آب اضافی است. قیرامولسیون نیز از مقدار (۰/۵ تا ۴٪) وزن مخلوط با افزایش ۰/۵٪ اضافه شد. نمونه ها با استفاده از قالب و چکش مارشال با اعمال ۵۰ ضربه به هر طرف آنها متراکم شدند. عملیات ساخت و تراکم نمونه ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد. پس از این مرحله، نمونه ها درون گرمخانه با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶ ساعت عمل آوری شده و قبل از خروج نمونه ها از قالب، ۴۸ ساعت در دمای اتاق عمل آوری ادامه یافت. پس از خروج نمونه ها از قالب وزن مخصوص حقیقی و حداکثر آنها به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D2726 و ASTM D2041 تعیین شدند. همچنین





شکل ۲. الف) باطله زغال‌سنگ قبل و ب) بعد از سوراخ کردن (خاکستر)

شرایط رطوبت بهینه نشان داد، با افزایش درصد استفاده از باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن، استقامت مارشال و مقاومت کششی مخلوط بازیافت‌شده افزایش می‌یابد. در واقع مخلوط‌های حاوی ۷٪ باطله زغال‌سنگ یا خاکستر آن بیشترین استقامت مارشال و مقاومت کششی را نسبت به مخلوط بدون افزودنی کسب کردند. بنابراین در این پژوهش مقدار استفاده از پودر باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن به ۷٪ وزنی مخلوط محدود شد. از سوی دیگر عدم استفاده قبلی از این ماده در مخلوط بازیافت‌شده عامل دیگری برای محدودیت استفاده از آن در درصد‌های بالا است. به این نکته نیز باید توجه شود که استفاده از افزودنی‌های پوزولانی در مخلوط‌های بازیافت‌شده با قیرامولسیون باعث افزایش بیش از حد سختی شده و حتی در درصد‌های بالا می‌تواند موجب تغییر ماهیت آسفالتی مخلوط گردد. [Pérez et al. 2013]

## ۶. برنامه آزمایشگاهی

### ۶-۱ عمل‌آوری

دو نوع روش عمل‌آوری خشک (بدون پوشش) برای نمونه‌های مخلوط بازیافت‌شده انجام شد:

عمل‌آوری در گرمخانه (عمل‌آوری تسریع‌شده): نمونه‌ها درون گرمخانه و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا زمانی که وزن آن‌ها ثابت شود. معمولاً زمان لازم برای رسیدن به وزن ثابت ۷۲ ساعت

استقامت مارشال نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D1559 به دست آمد. تنها معیار طراحی برای تعیین مقدار قیرامولسیون بهینه فضای خالی بین ۹ تا ۱۴٪ است [Kavussi and Modarres, 2010]. با استفاده از این معیار، مقدار قیرامولسیون چنان تعیین شد که وزن واحد حجم مخلوط و استقامت مارشال آن حداکثر باشد. بنابراین بر این اساس مقدار قیرامولسیون بهینه برابر ۲/۵٪ انتخاب شد. در مرحله بعد مقدار بهینه رطوبت برای نمونه بدون افزودنی و نمونه‌های حاوی افزودنی تعیین شد. به‌عنوان نمونه نتایج تفصیلی طرح اختلاط مربوط به مخلوط بدون افزودنی در جدول ۶ مشاهده می‌گردد. همچنین مقدار رطوبت بهینه برای ترکیب‌های مورد مطالعه، در جدول ۷ ارائه شده است.

تاکنون روشی برای تعیین مقدار استفاده از خاکستربادی یا پوزولان‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت‌شده ارائه نشده است [ARRA, 2001]، در حالی که سیمان و آهک معمولاً به میزان ۱ تا ۳٪ استفاده می‌شوند [Kim and Lee, 2012]. در تحقیقات قبلی از ۷٪ خاکستربادی همراه با قیرامولسیون برای تولید مخلوط بازیافت‌شده با روش سرد استفاده شده بود [Benson et al., 2009]. در این پژوهش، تاثیر مقدار استفاده از پودر باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن بر استقامت مارشال و مقاومت کششی مخلوط بررسی شد. به‌طوری که ۰٫۳ و ۰٫۷٪ از باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن به مخلوط اضافه شد. نتایج آزمایشها در

جدول ۶. نتایج تفصیلی طرح اختلاط مربوط به مخلوط بدون افزودن

الف - قیرامولسیون بهینه (%)						
قیرامولسیون بهینه (%)	استقامت مارشال (kN)	فضای خالی (%)	چگالی حداکثر	چگالی حقیقی	رطوبت (%)	قیرامولسیون (%)
۲/۵	۶/۲	۱۷/۳۹	۲/۵۴۱	۲/۰۹۹	۳	۰/۵
	۶/۴۴	۱۶/۷۳	۲/۵۲۲	۲/۱۰۰	۳	۱
	۶/۵	۱۵/۵۳	۲/۵۰۴	۲/۱۱۵	۳	۱/۵
	۶/۷۸	۱۴/۴۱	۲/۴۸۴	۲/۱۲۶	۳	۲
	۶/۲۹	۱۳/۴۸	۲/۴۶۳	۲/۱۳۱	۳	۲/۵
	۵/۸۴	۱۲/۸۶	۲/۴۴۹	۲/۱۳۴	۳	۳
	۳/۷۵	۱۲/۵۴	۲/۴۳۲	۲/۱۲۷	۳	۳/۵
	۳/۳۷	۱۲/۴	۲/۴۱۹	۲/۱۱۹	۳	۴
ب- رطوبت بهینه (%)						
رطوبت بهینه (%)	استقامت مارشال (kN)	فضای خالی (%)	چگالی حداکثر	چگالی حقیقی	رطوبت (%)	قیرامولسیون (%)
۲/۹	۶/۲۵	۱۴/۴۹	۲/۴۷۰	۲/۱۱۲	۱	۲/۵
	۶/۸۱	۱۳/۷۷	۲/۴۶۱	۲/۱۲۲	۲	۲/۵
	۷/۲۴	۱۳/۰۴	۲/۴۵۴	۲/۱۳۴	۳	۲/۵
	۶/۷۶	۱۳/۸۵	۲/۴۶۸	۲/۱۲۶	۴	۲/۵
	۵/۸۵	۱۴/۶۷	۲/۴۷۳	۲/۱۱۰	۵	۲/۵

جدول ۷. نوع ترکیبها و مقادیر رطوبت بهینه

نوع افزودنی	نوع افزودنی			نوع ترکیب
	رطوبت بهینه (%)	خاکستر باطله زغال سنگ (%)	باطله زغال سنگ (%)	
بدون افزودنی	۲/۹	-	-	-
۱	۴	-	-	۳
۲	۴/۵	-	۷	-
۳	۵/۲	-	۵	۳
۴	۴/۱	۷	-	-
۵	۵/۳	۵	-	۳

### ۶-۲ آزمایش مارشال

آزمایش مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 برای ترکیبهای مختلف در دمای 60°C و با نرخ بارگذاری 50 mm/min انجام شد. نسبت استقامت مارشال (kN) به روانی (mm) را خارج قسمت مارشال<sup>۱</sup> (MQ) می نامند. از MQ به عنوان شاخصی برای مقاومت مصالح در برابر تغییر شکل های ماندگار در دوران سرویس دهی روسازی استفاده می شود. مقادیر بالاتر MQ نشان دهنده مخلوطی سخت تر و مقاوم تر است. این مسئله به خوبی شناخته شده است که بالاتر بودن

است [Wirtgen, 2012, Papavasiliou and Loizos, 2013].

عمل آوری در محیط: از آنجا که عمل آوری تسریع شده یعنی عمل آوری در شرایط دمایی بالا و شرایط اشباع طولانی (شرایط رطوبتی غیرواقعی) نمی تواند مدل دقیقی از واقعیت باشد [Ba-tista, 2004]، عمل آوری برخی از نمونه ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و در سنین مختلف انجام شد. هدف از انجام این نوع عمل آوری، کند کردن سرعت شکست قیرامولسیون بود که منجر به ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی در درازمدت می شود.

مقدار MQ، نشان‌دهنده مخلوطی مقاوم‌تر در برابر تنش‌های برشی و تغییر شکل‌های ماندگار است [Ameri and Behnood, 2012].

### ۶-۳ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم<sup>۹</sup> (ITS)

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم به منظور تعیین ویژگی‌های کششی مخلوط آسفالتی انجام می‌شود، که می‌تواند به ویژگی‌های ترک‌خوردگی مخلوط نیز مرتبط باشد [Niazi and Jalili, 2009]. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس روش ASTM D 6931 انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌ها بین دو نوار بارگذاری که تنش کششی را در راستای قطر نمونه ایجاد می‌کند و نهایتاً باعث دو نیم شدن نمونه می‌شود، قرار می‌گیرند. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. مقاومت کششی نمونه‌ها مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

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

که در آن ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (kPa)،  $P_{max}$  بار حداکثر (N)،  $d$  قطر نمونه (mm) و  $t$  ارتفاع نمونه (mm) هستند. مشاهدات نشان داد که نحوه شکست نمونه‌ها برای افزودنی‌های مختلف باهم تفاوت دارد. در خلال انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم دو نوع شکست به طور کلی مشاهده شد:

نوع اول: شکست آشکار در راستای قطر که گاهی با قطعات مثلثی در نزدیکی نوار بارگذاری همراه است.

نوع دوم: در نزدیکی نوار بارگذاری تغییر شکل بیش از حد و در نزدیکی مرکز نمونه یک صفحه شکست مشاهده می‌گردد.

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی گسیختگی نمونه‌های که فقط دارای آهک بودند، از نوع دوم و گسیختگی سایر نمونه‌ها از نوع اول بود.

### ۶-۴ آزمایش حساسیت رطوبتی

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های بازیافت شده با قیر امولسیون به وسیله آزمایش مارشال در معرض رطوبت و آزمایش AASH-

TO T283 مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مورد مطالعه به وسیله آزمایش مارشال، برای هر ترکیب ۶ نمونه (سه نمونه حالت خشک و سه نمونه در معرض رطوبت) ساخته شد. شرایط عمل‌آوری در گرمخانه برای نمونه‌ها در این آزمایش اعمال شد. نمونه‌ها در حمام آب با دمای ۶۰ °C به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. سپس استقامت مارشال نمونه‌ها با نرخ بارگذاری 50 mm/min به دست آمد. همچنین نسبت استقامت مارشال<sup>۱۰</sup> MSR طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$MSR = 100 \times \frac{MS_{con}}{MS_{uncon}} \quad (2)$$

به طوری که  $MS_{con}$  میانگین استقامت مارشال نمونه‌های اشباع و  $MS_{uncon}$  میانگین استقامت مارشال نمونه‌های خشک است. از شاخص MSR می‌توان به عنوان یک معیار برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد [Niazi and Jalili, 2009]. افزون بر این برای انجام آزمایش AASHTO T283، برای هر ترکیب ۶ نمونه (سه نمونه حالت خشک و سه نمونه در معرض رطوبت) ساخته شد. نسبت مقاومت کششی<sup>۱۱</sup> TSR طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$TSR = 100 \times \frac{St_{con}}{St_{uncon}} \quad (3)$$

که در آن  $St_{con}$  میانگین مقاومت کششی نمونه‌های اشباع و  $St_{uncon}$  میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک است. از شاخص TSR برای پیش‌بینی حساسیت در برابر عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. مقدار حداقل TSR برای مخلوط آسفالتی گرم ۰/۸ است. اما تاکنون حداقل مقدار استاندارد TSR برای مخلوط‌های بازیافت شده با روش سرد تعیین نشده است [Ameri and Behnood, 2012].

### ۶-۵ مدول برجهندگی<sup>۱۲</sup> (Mr)

مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی که طبق استاندارد ASTM D4123 با روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود، یکی از

استقامت مارشال توانایی مقاومت بتن آسفالتی در برابر جمع‌شدگی و شیارشدگی و همچنین روانی، توانایی مقاومت بتن آسفالتی را در برابر نشست تدریجی و تغییرشکل بدون ترک‌خوردگی نشان می‌دهد [Ameri and Behnood, 2012]. با توجه به نتایج جدول ۸، ترکیب حاوی باطله زغال‌سنگ و آهک (نوع ۳) و ترکیب حاوی خاکستر باطله و آهک (نوع ۵) بیشترین مقدار استقامت مارشال و شاخص MQ را به خود اختصاص داده‌اند. با در نظر گرفتن ترکیبات شیمیایی باطله زغال‌سنگ و خاکستر باطله طبق جدول ۵ که حاوی مواد پوزولانی است، می‌توان دریافت که افزودن آهک موجب وقوع واکنش‌های سیمانی شده که به افزایش استقامت مارشال و کاهش روانی مخلوط منجر شده‌است. همچنین در ترکیب حاوی باطله زغال‌سنگ (نوع ۲) و خاکستر باطله زغال‌سنگ (نوع ۴) افزایش استقامت مارشال نسبت به مخلوط بدون افزودنی مشاهده شد، این افزایش برای مخلوط حاوی خاکستر باطله زغال‌سنگ بیشتر است. زیرا خاکستر باطله زغال‌سنگ با توجه به مقدار L.O.I کمتر و به تبع آن کاهش زغال‌سنگ و افزایش SiO<sub>2</sub> در ترکیب شیمیایی، خاصیت پوزولانی بیشتری دارد. پوزولان با قابلیت جذب آب موجود در قیرامولسیون نه تنها باعث تسریع در گیرش مخلوط می‌شود، بلکه در صورت وجود رطوبت کافی باعث ایجاد زل‌های شبه-سیمانی در اطراف مصالح خرده‌آسفالتی شده و نهایتاً چسبندگی نیز افزایش می‌یابد [Al-Busaltan et al. 2012]. معمولاً استفاده از افزودنی‌های پوزولانی در مخلوط‌های بازیافت‌شده با قیر امولسیون باعث افزایش استقامت و به‌طور کلی سختی مخلوط، می‌شود [Niazi and Jalili, 2009, Pérez et al., 2013, Al-Busaltan et al. 2012]. مطابق نتایج منعکس‌شده در جدول ۸، ترکیب حاوی پودر آهک (نوع ۱) به‌تنهایی نمی‌تواند ویژگی‌های مکانیکی مخلوط را بهبود بخشد، ریزبودن بیش از حد آهک و مقدار استفاده از آن می‌تواند دلیلی برای این موضوع باشد. البته باید توجه شود که

رایج‌ترین روش‌های تعیین نمودار تنش-کرنش جهت ارزیابی خصوصیات الاستیک است [Tayfur et al, 2007]. اکثر مصالح مورد استفاده در روسازی راه‌ها دارای خاصیت الاستیک نبوده و در اثر اعمال بار دچار تغییرشکل‌های ماندگار می‌شوند. علی‌رغم این مورد در صورتی که بار اعمالی در مقایسه با مقاومت ماده کوچک بوده و مکرراً اعمال گردد، تغییرشکل ایجاد شده در هر سیکل بارگذاری تقریباً به‌طور کامل برگشت‌پذیر بوده و در این شرایط می‌توان ماده را الاستیک فرض کرد [Huang, 1993]. برای هریک از مخلوط‌های مورد مطالعه آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، با شکل بارگذاری نیم‌سینوسی با سطح تنش برابر با ۲۰٪ مقاومت کششی و با فرکانس ۱ هرتز اعمال شد. در این آزمایش سیکل بارگذاری یک ثانیه، مدت زمان اعمال بار ۰/۱ ثانیه، مدت زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون نیز ۰/۳۵ فرض شد. مقدار تغییرشکل افقی به وسیله دو مبدل دیفرانسیل خطی متغیر LVDT<sup>۱۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود. برای یک بار دینامیکی با حداکثر اندازه P که تغییرشکل‌های افقی ناشی از آن اندازه‌گیری شده‌اند، مدول برجهنگی طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.27)}{t \delta_h} \quad (4)$$

که در این رابطه، M<sub>r</sub>: مدول برجهنگی (MPa)، P: حداکثر اندازه بار دینامیکی (N)، μ: ضریب پواسون برابر ۰/۳۵، t: طول نمونه (mm)، δ<sub>h</sub>: تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر کل (mm) هستند.

## ۷. بررسی و تفسیر نتایج

### ۷-۱ آزمایش مارشال

در جدول ۸ نتایج آزمایش مارشال برای نمونه‌های تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه ارائه شده‌است. مقادیر ارائه‌شده میانگین مقادیر برای سه نمونه هستند. بیشترین استقامت و کمترین روانی، به‌عنوان یک معیار در آزمایش مارشال شناخته شده‌است.

## استفاده از پودر ضایعات زغال‌سنگ و آهک در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت‌شده با قیرامولسیون

ماده به‌تنهایی است. همچنین مشخص است که مقادیر استقامت مارشال برای عمل‌آوری ۷ روزه نسبت به مقادیر به دست‌آمده در عمل‌آوری در گرمخانه کمتر است. دلیل این مسئله افزایش سرعت شکست قیرامولسیون تحت عمل‌آوری در گرمخانه و به‌تبع آن کسب استقامت بیشتر است، یعنی در طی ۷ روز عمل‌آوری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رطوبت موجود در نمونه تبخیر نشده، بنابراین سرعت شکست نیز کاهش یافته و نمونه‌ها به مقاومت واقعی خود نرسیده‌اند. بیشترین استقامت مارشال مربوط به مخلوط حاوی خاکستر باطله زغال‌سنگ و آهک (نوع ۵) تحت شرایط عمل‌آوری ۲۸ روزه در محیط است. این افزایش ثابت می‌کند که آهک به‌عنوان مکمل مناسبی برای باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن انتخاب شده‌است. در واقع یکی از دلایل

استفاده از آهک به‌صورت دوغاب در بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط بازیافت‌شده با قیرامولسیون، نسبت به پودر آهک مؤثرتر است. در این تحقیق همچنین تغییرات استقامت مارشال به‌منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر آن مطالعه شد. برخی از نمونه‌ها تحت شرایط عمل‌آوری در محیط (۷ و ۲۸ روزه) قرار گرفتند. مقادیر استقامت مارشال برای نمونه‌ها تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه و محیط در شکل ۳ ارائه شده‌است.

نتایج ارائه شده در شکل (۳) نشان می‌دهند که با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روزه، استقامت مارشال افزایش پیدا می‌کند. استفاده از افزودنی‌ها به‌جز آهک باعث افزایش استقامت مارشال مخلوط‌ها شده‌است. علت این مسئله می‌تواند ناشی از فقدان ترکیبات پوزولانی در آهک باشد که باعث عدم تأثیرگذاری این

جدول ۸. خلاصه نتایج آزمایش مارشال

نوع ترکیب	استقامت مارشال (kN)	روانی (mm)	MQ (kN/m)
بدون افزودنی	۱۰/۲۱	۳/۰۹	۳/۳۰
۱	۱۰/۰۵	۳/۱۲	۳/۲۲
۲	۱۰/۸۳	۲/۸۶	۳/۷۸
۳	۱۳/۶۸	۲/۴۱	۵/۶۷
۴	۱۱/۵۴	۲/۳۲	۴/۹۷
۵	۱۴/۰۹	۲/۲۶	۶/۲۳



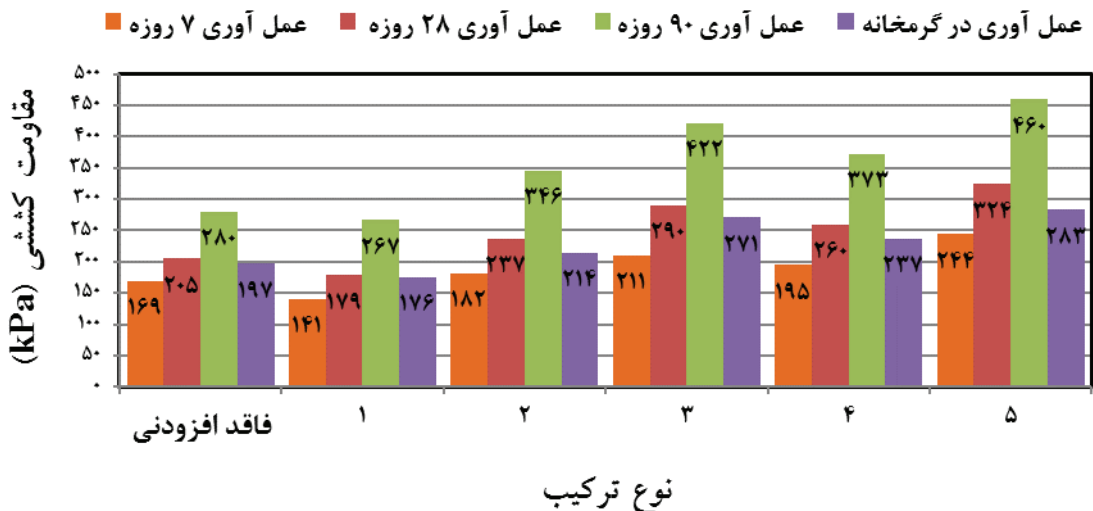
شکل ۳. میانگین مقادیر استقامت مارشال مخلوط‌ها تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه و محیط

باطله زغال سنگ به صورت طبیعی و خاکستر به تنهایی و یا همراه با آهک مقاومت کششی نمونه‌ها را در درازمدت افزایش می‌دهد. این افزایش در خصوص ترکیب حاوی باطله زغال سنگ و آهک (نوع ۳) و خاکستر باطله زغال سنگ همراه با آهک (نوع ۵) به علت وقوع واکنش‌های سیمانی بیشتر است. مخلوط حاوی ۳٪ آهک (نوع ۱)، نتوانست باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط شود. البته در تحقیقات قبلی نیز ثابت شده است که افزودن ۲٪ آهک در مخلوط بازیافت شده با قیر امولسیون نتوانست افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت کششی ایجاد کند [Niazi and Jalili, 2009]. همچنین نتایج به دست آمده از شکل‌های ۳ و ۴ تا حد زیادی مشابه هستند. افزایش مقاومت کششی ترکیب حاوی پودر باطله زغال سنگ (نوع ۲) کمتر از ترکیب حاوی خاکستر باطله زغال سنگ (نوع ۴) است. این مسئله با توجه به ترکیب شیمیایی باطله زغال سنگ در جدول ۵، قابل توجیه است. اگرچه تحقیقات انجام شده اثرات مخربی را برای کربن نسوخته گزارش نکرده‌اند ولی این ماده هیچ گونه خاصیت پوزولانی یا چسبانندگی نداشته و صرفاً یک پرکننده است. بنابراین در یک درصد وزنی ثابت از خاکستر باطله درصد بیشتری مواد پوزولانی در ترکیب داشته و می‌تواند اثرات بهتری را از خود نشان دهد.

افزایش استقامت وقوع واکنش پوزولانی بین  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$  و  $Ca(OH)_2$  در حضور رطوبت موجود در مخلوط و قیرامولسیون است [Al-Busaltan et al., 2012]، که در درازمدت با پیشرفت واکنش، افزایش استقامت مارشال مشهودتر است [LI Xiangguo et al, 2013]. ترکیب مواد پوزولانی موجود در باطله زغال سنگ و خاکستر آن با آهک باعث پیشرفت واکنش پوزولانی می‌گردد، که اثرات آن معمولاً در دراز مدت بیشتر واضح می‌شود.

### ۷-۲ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

میانگین مقادیر مقاومت کششی سه نمونه برای مخلوط‌های مختلف تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه و محیط (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقادیر مقاومت کششی نمونه‌ها تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه بسیار کمتر از مقادیر مقاومت کششی نمونه‌ها تحت شرایط عمل‌آوری ۹۰ روزه در محیط است. همچنین مقاومت کششی نمونه بدون افزودنی و نمونه حاوی آهک (نوع ۱) تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه به مقادیر مقاومت کششی تحت شرایط عمل‌آوری ۲۸ روزه نزدیک است. به طور کلی استفاده از



شکل ۴. میانگین مقادیر مقاومت کششی تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه و محیط

### ۷-۳ آزمایش حساسیت رطوبتی

مقادیر استقامت مارشال و مقاومت کششی نمونه‌ها تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه، در شرایط خشک و اشباع و همچنین مقادیر شاخص‌های MSR و TSR در جدول ۹ ارائه شده‌است. مقادیر شاخص‌های MSR و TSR نشان می‌دهد که استفاده آهک (ترکیب نوع ۱) حساسیت رطوبتی مخلوط بازیافت‌شده را کاهش می‌دهد. با توجه به مقادیر MSR و TSR، باطله زغال‌سنگ به‌تنهایی نمی‌تواند موجب کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط شود. این درحالی است که خاکستر باطله زغال‌سنگ باعث افزایش مقاومت در برابر رطوبت شده. با توجه به ترکیبات شیمیایی باطله زغال‌سنگ که در جدول ۵ ارائه شده‌است، دلیل کاهش شاخص‌های MSR و TSR ناچیز بودن ترکیبات آهکی در باطله زغال‌سنگ است. دلیل دیگر برای پایین بودن نسبت MSR و TSR مخلوط حاوی باطله زغال‌سنگ (نوع ۲) قدرت جذب بالا توسط این مواد است [Kandhal, 1992]. افزودن آهک به باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن ماده‌ای شبه‌سیمان ایجاد می‌کند. بر این اساس وقوع واکنش‌های پوزولانی باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط می‌شود. همچنین بالا بودن نسبت TSR و MSR در مخلوط حاوی باطله زغال‌سنگ همراه با آهک (نوع ۳) و خاکستر باطله زغال‌سنگ همراه با آهک (نوع ۵) با توجه به پیشرفت واکنش پوزولانی و افزایش مقاومت قابل توجه است.

زیرا وجود رطوبت کافی برای نمونه‌های اشباع باعث پیشرفت در شکل‌گیری زل‌های سیمانی در اطراف مصالح خرده‌آسفالتی می‌شود. در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده‌است که اشباع شدن نمونه‌های بازیافت‌شده حاوی قیرامولسیون و سیمان به وقوع واکنش‌های سیمانی کمک می‌کند [Brown and Needham, 2000].

### ۷-۴ آزمایش مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای ترکیب‌های مختلف در شکل ۵ ارائه شده‌است. مقادیر مدول برجهندگی ترکیب‌های حاوی باطله زغال‌سنگ (نوع ۲) و خاکستر آن (نوع ۴) در مقایسه با ترکیب بدون افزودنی افزایش یافته است. البته این افزایش برای نمونه حاوی خاکستر ضایعات زغال‌سنگ چشمگیرتر است. به‌طور کلی در مخلوط‌های بازیافت شده، افزایش مقدار قیر امولسیون، سبب افزایش مقاومت در برابر رطوبت و انعطاف‌پذیری می‌شود، درحالی‌که افزایش مقدار افزودنی‌های پوزولانی مانند سیمان، سبب افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار و کاهش انعطاف‌پذیری لایه بازیافت شده خواهد شد [Pérez et al. 2013]. بنابراین خاکستر ضایعات زغال‌سنگ مانند یک ماده پوزولانی رفتار کرده و سبب افزایش سختی مخلوط شده‌است. البته قابلیت پرکنندگی باطله زغال‌سنگ

جدول ۹. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

نوع ترکیب	استقامت مارشال (KN)		مقاومت کششی (kPa)	
	نمونه خشک	نمونه اشباع	نمونه خشک	نمونه در اشباع
بدون افزودنی	۱۰/۲۱	۵/۳۲	۱۹۷	۱۰۳
۱	۱۰/۰۵	۹/۸۶	۱۷۶	۱۵۳
۲	۱۰/۸۳	۵/۴۲	۲۱۴	۱۰۲
۳	۱۳/۶۸	۹/۲۰	۲۷۱	۲۱۰
۴	۱۱/۵۴	۷/۵۷	۲۳۷	۱۴۳
۵	۱۴/۰۹	۱۱/۸۴	۲۸۳	۲۴۵

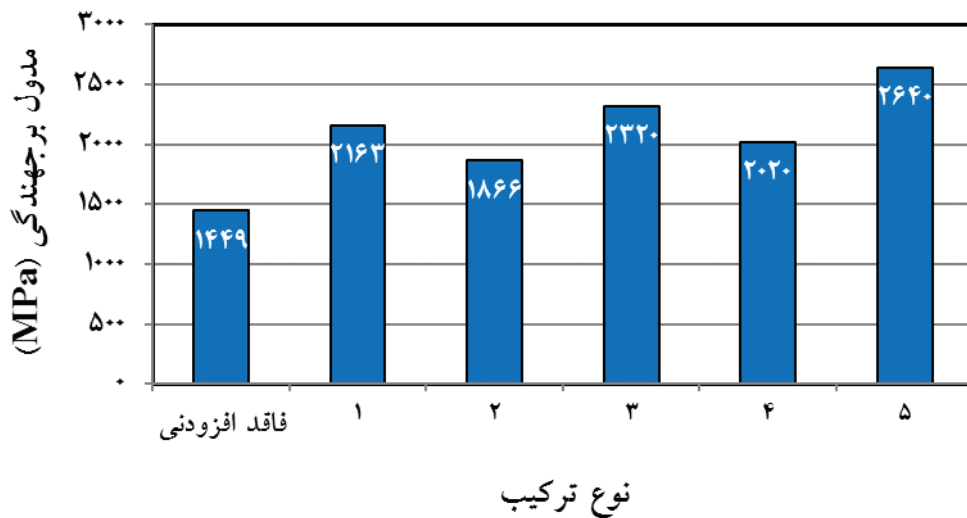
افزایش می‌دهد [Michael et al. 2003]. لازم به ذکر است که در تحقیقات قبلی استفاده از ۲٪ آهک تأثیر ناچیزی بر استقامت مارشال و مقاومت کششی مخلوط بازیافت شده با قیرامولسیون داشت، در عین حال مدول برجهندگی مخلوط را افزایش داده بود [Niazi and Jalili, 2009].

## ۸. نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط بازیافت شده با قیر امولسیون حاوی پودر باطله زغال سنگ به صورت طبیعی و خاکستر انجام شد. همچنین از آهک نیز به عنوان یک افزودنی رایج در بازیافت سرد آسفالت به صورت مجزا و ترکیبی استفاده شد. براساس یافته‌های به دست آمده از ارزیابی‌های آزمایشگاهی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

۱. نتایج آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی نشان می‌دهند که استفاده از ۷٪ ضایعات زغال سنگ به صورت طبیعی و خاکستر به عنوان افزودنی در مخلوط بازیافت شده با قیرامولسیون سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط شده، به طوری که استقامت مارشال، مقاومت کششی و مدول برجهندگی افزایش یافته است. البته این ارتقاء

و خاکستر آن در بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط نباید نادیده گرفته شود. بیشترین مقدار مدول برجهندگی مربوط به ترکیب‌های حاوی باطله زغال سنگ همراه با آهک (نوع ۳) و خاکستر باطله زغال سنگ همراه با آهک (نوع ۵) است. با توجه به این مسئله ترکیب این ضایعات با آهک رفتاری مشابه سیمان دارد، باعث سختی قیر و بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه شده و سرانجام مدول برجهندگی را افزایش داده است [Niazi and Jalili, 2009]. اخیراً پژوهشگران استفاده از فیلرهای پوزولانی را به دلیل قابلیت جذب رطوبت در مخلوط‌های امولسیونی توصیه کرده‌اند. جذب آب قیرامولسیون باعث تسریع در گیرش مخلوط شده و از سوی دیگر پوزولان با آب موجود در مخلوط واکنش داده و منجر به تشکیل ژل‌های شبه‌سیمانی در اطراف مصالح می‌شود. تسریع در گیرش و افزایش چسبندگی مصالح باعث افزایش سختی شده و تا زمانی که آب کافی در مخلوط باشد، روند افزایش سختی ادامه می‌یابد [Al-Busaltan et al. 2012]. همچنین نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد که استفاده از ۳٪ آهک (ترکیب نوع ۱) باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط شده است. تحقیقات قبلی نیز نشان می‌دهند که استفاده از دوغاب آهک بدون توجه به نوع قیر امولسیون بکار رفته، به طور قابل ملاحظه ای مدول برجهندگی را



شکل ۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی



مانند سیمان و آهک انجام می‌گیرد. همچنین خاکستر باطله زغال‌سنگ با توجه به کاهش مقدار کربن (L.O.I) موجود، نسبت به باطله زغال‌سنگ بر ارتقاء عملکرد مکانیکی و دوام مخلوط بازیافت‌شده اثرگذاری بیشتری دارد. نهایتاً استفاده از این ضایعات در مخلوط‌های بازیافت‌شده با قیر امولسیون به‌عنوان یک اقدام جدید در راستای حفظ منابع طبیعی و دستیابی به یک فرآیند بازیافت سازگارتر با محیط‌زیست منجر می‌شود.

#### ۱۱. پی‌نوشت‌ها

- 1.Gravity concentration machine
- 2.Flotation
- 3.Acid mine drainage
- 4.waste dump
- 5.Reclaimed asphalt pavement
- 6.Baum
- 7.Loss on ignition
- 8.Marshall quotient
- 9.Indirect tensile strength
- 10.Marshall stability ratio
- 11.Tensile strength ratio
- 12.Resilient modulus
13. Linear variable differential transformer

#### ۱۲. مراجع

- Abu Al-Rub, R. K., Darabi, M. K., Kim, S. M., Little, D. N. and Glover, C. J. (2013) "Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging-susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 41, April, pp. 439-454.
- Al-Busaltan, S. Al Nageim, H., Atherton, W. and Sharples, G. (2012) "Green bituminous asphalt relevant for highway and airfield pavement", *Construction and Building Materials*, vol. 31, June, pp. 243-250.
- Ameri, M. and Behnood, A. (2012) "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates", *Construction and Building Materials*, 26(1),

برای نمونه‌های حاوی خاکستر باطله زغال‌سنگ به دلیل وجود مواد پوزولانی بیشتر در ترکیب شیمیایی آن، مخصوصاً در درازمدت مشهودتر است. همچنین استفاده از ۳٪ پودر آهک به‌عنوان افزودنی در مخلوط بازیافت‌شده با قیرامولسیون نتوانست باعث افزایش استقامت مارشال، مقاومت کششی شود، هرچند که مدول‌برجهنگی مخلوط را افزایش داد.

۲. بررسی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد استفاده از ۷٪ باطله زغال‌سنگ به‌تنهایی نمی‌تواند مقاومت مخلوط را در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت افزایش دهد. این در حالی است استفاده از خاکستر باطله زغال‌سنگ باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط بازیافتی و افزایش نسبت مقاومت کششی شد. همچنین نتایج نشان داد، استفاده از ۳٪ پودر آهک می‌تواند به‌صورت چشمگیری حساسیت رطوبتی مخلوط را کاهش دهد.

۳. افزودن آهک به‌عنوان یک مکمل برای پودر باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط، مخصوصاً در درازمدت می‌شود. همچنین به‌صورت چشمگیری حساسیت رطوبتی مخلوط را کاهش می‌دهد. در واقع استفاده از آهک به‌عنوان مکمل برای باطله زغال‌سنگ و خاکستر آن ماده‌ای شبه‌سیمان ایجاد می‌کند که به‌دلیل وقوع واکنش‌های سیمانی باعث رشد مقاومت در بلندمدت می‌شود.

۴. شرایط و زمان عمل‌آوری تاثیر مهمی بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط بازیافت‌شده دارد. این تاثیر مخصوصاً زمانی آشکار می‌شود که مخلوط حاوی پوزولان ضایعاتی (باطله زغال‌سنگ یا خاکستر آن) و آهک باشد.

۵. استفاده از باطله زغال‌سنگ نه‌تنها باعث کاهش انبساط مواد آلاینده در طبیعت است، بلکه برای تولید آن نیازی به اعمال هیچگونه عملیات حرارتی و مصرف انرژی نیست. از دیدگاه زیست محیطی نیز، تولید خاکستر این ضایعات در دمای کمتری (۷۵۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت به دمای تولید سایر افزودنی‌ها

- monitoring and assessment, vol. 183, no. 1–4, December, pp. 41–55.
- Fager, G. A. (2004) “Lime slurry in cold inplace recycles”, Final report No. FHWA-KS-03-3, Kansas Department of Transportation, Kansas, USA.
  - Frías, M., Sanchez de Rojas, M. I., García, R., Juan Valdés, A. and Medina, C. (2012) “Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 5, May, pp. 678–683.
  - Han, C. (1995) “Waste products in highway construction”, Minnesota Local Road Research Board (LRRB), Office of Research Administration, Minnesota, USA.
  - Huang, Yang. H (1993) “Pavement analysis and design”, USA, New Jersey: Prentice Hall.
  - Iowa Highway Research Board. (2003) “Development of a mix design process for cold-in-place rehabilitation using foamed asphalt”, Final report for TR-474 Phase I, Iowa, USA.
  - Kandhal, P. S. (1992) “Waste materials in hot mix asphalt—an overview”, ASTM Meeting in Miami, Florida. National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 92–06. Auburn University, Alabama. USA.
  - Kavussi, A. and Modarres, A. (2010) “Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement” *Construction and Building Materials*, vol. 24, No. 10, October, pp. 1920–1927.
  - Kim, Y and Lee, H.D. (2012) “Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 4, April, pp. 586–593.
  - Kinuthia, J. and Nidzam, R. (2009) “Effect of slag and siliceous additions on the performance of stabilized coal waste backfill”, World of Coal Ash 2009 (WOCA) Conference, Lexington, KY, USA.
  - Laskowski, Janusz (2001) “Coal flotation and fine coal utilization”, The Netherlands, Amsterdam: Elsevier. pp.475–480.
  - ARRA (2001) “Basic asphalt recycling manual”, Publication No. NHI01-022, Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), Annapolis, Maryland, USA.
  - Batista, F.A. (2004) “Asphalt cold mixtures for pavement rehabilitation overlays and recycling”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal.
  - Benson, C., Edil, T., Ebrahimi, A. and Kootstra, B. (2009) “Appendices to use of fly ash for reconstruction of bituminous roads”, Minnesota Department of Transportation Research Services Section, Minnesota, USA.
  - Brown, S. F. and Needham, D. (2000) “A study of cement modified bitumen emulsion mixtures”, *Proceedings Association of Asphalt Pavement Technologists*. vol. 69, pp.92-121. Reno, Nevada, USA.
  - Cross, S. A. and Jakatimath, Y. (2007) “Evaluation of cold in-place recycling for rehabilitation of transverse cracking on US 412”, Final report, No. FHWA/OK 07 (04), Oklahoma Department of Transportation, Oklahoma, USA.
  - Cuelho, E., Mokwa, R. and Akin, M. (2006) “Preventive maintenance treatments of flexible pavements: a synthesis of highway practice”, Final project report No. FHWA/MT-06-009/8117-26, Montana Department of transportation, Western Transportation Institute, USA.
  - Doulati Ardejani, F., Jodieri Shokri, B., Bagheri, M. and Soleimani, E. (2010) “Investigation of pyrite oxidation and acid mine drainage characterization associated with Razi active coal mine and coal washing waste dumps in the Azad shahr–Ramian region, northeast Iran”, *Environmental Earth Sciences*, vol. 61, no. 8, February, pp. 1547–1560
  - Doulati Ardejani, F., Jodieri Shokri, B., Moradzadeh, A., Shafaei, S.Z. and Kakaei, R. (2011) “Geochemical characterisation of pyrite oxidation and environmental problems related to release and transport of metals from a coal washing low-grade waste dump, Shahrood, northeast Iran” ,*Environmental*

- Schneider, I. A. H. (2013) "Use of coal waste as fine aggregates in concrete paving blocks", *Geomaterials*, vol. 3, No. 2, April, pp. 54–59.
- Shalhoseiny, M., Doulati Ardejani, F., Shafaei, S. Z., Noaparast, M. and 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*, vol. 32, No. 2, March, pp. 84–96.
- Suleiman, N., (2002) "A state-of-the-art review of cold in-place recycling of asphalt pavements in the northern plains region", Final Report, Research Sponsored by North Dakota Department of Transportation, University of North Dakota, Grand Forks, ND, USA.
- Szczepanska, J. and Twardowska, I. (1999) "Distribution and environmental impact of coal-mining wastes in Upper Silesia, Poland", *Environmental Geology*, vol. 38, No. 3, September, pp. 249–258.
- Wirtgen, (2012) "Wirtgen cold recycling technology", Germany, Windhagen: Wirtgen GmbH.
- Xiangguo, L. I., Xiaobo, Y. I. N., Baoguo, M. A., Jian, H. and Junxiao, L. I. (2013) "Cement-fly ash stabilization of cold in-place recycled (CIR) asphalt pavement mixtures for road bases or subbases", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*. vol. 28, No. 2, April, pp. 298–302.
- Xiao, J. and Yu, Y. (2011) "Research on moisture susceptibility of emulsion treated cold reclaimed asphalt mixture" ASCE, *Pavements and Materials*, Geotechnical Special Publication No. 212, pp.45–52.
- Zhang, H., Yu, J. and S. Wu. (2012) "Effect of montmorillonite organic modification on ultraviolet aging properties of SBS modified bitumen", *Construction and Building Materials*, vol. 27, No. 1, February, pp. 553–559.
- Zhengfu, B., Hilary, I., John, D., Frank, O. and Sue, S. (2010) "Environmental issues from coal mining and their solutions", *Mining Science and Technology (China)*, vol. 20, no. 2, March, pp. 215–223.
- Mallick, R. B., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Bradbury, R. L. and Kearney, E. J. (2002) "Development of a rational and practical mix design system for Full Depth Reclamation (FDR)" In: *Proceedings of the annual meeting of Asphalt Paving Technologists*.
- Martínez-Echevarría, M. J., José, M., Recasens, R. M., Gámez, M. C. R. and Ondina, A. M. (2012) "In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions", *Construction and Building Materials*, vol. 36, November, pp. 918–924.
- Michael, S. S., Chadbourn, B. A. and Andrew, D. (2002) "Investigation of recycled asphalt pavement (rap) mixtures", Final report No. MN/RC – 2002-15, Office of Research Services, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, USA.
- Niazi, Y. and Jalili, M. (2009) "Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion", *Construction and Building Materials*, vol. 23, No. 3, March, pp. 1338–1343.
- Paoli, L., Guttová, A., Grassi, A., Lackovičová, A., Senko, D. and Loppi, S. (2014) "Biological effects of airborne pollutants released during cement production assessed with lichens (SW Slovakia)", *Ecological Indicators*, vol. 40, May, pp. 127–135.
- Papavasiliou, V. and Loizos, A. (2013) "Field performance and fatigue characteristics of recycled pavement materials treated with foamed asphalt", *Construction and Building Materials*, vol. 48, November, pp. 677–684.
- Pérez, I., Medina, L. and Ángel, M. (2013) "Mechanical properties and behaviour of in situ materials which are stabilised with bitumen emulsion", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14 no. 2, December, pp.221–238.
- Ribeiro, J., Silva, T., Mendonca Filho, J. G. and Flores, D. (2012) "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in burning and non-burning coal waste piles" *Journal of hazardous materials*, vol. 199–200, January, pp. 105–110.
- Santos, C. R., Filho, J. R. A., Tubino, R. M. C. and

