



بررسی استفاده از باطله زغال سنگ در مخلوط آسفالتی و تاثیر آن بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با رویکرد آزمایش های شیمی قیر و مکانیکی مخلوط آسفالتی

مریم قلی زاده^{۱*}، حسن دیواندری^۲، سعید صبحی^۳

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شمال آمل، آمل، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالتی داغ

حساسیت رطوبتی

انرژی آزاد سطحی

باطله زغال سنگ

طیف‌سنجی مادون قرمز

خلاصه: حساسیت رطوبتی یکی از عوامل اصلی بروز بسیاری از خرابی‌های تاثیرگذار بر عملکرد و دوام مخلوط‌های آسفالتی است. این خرابی با ورود رطوبت (آب) به لایه روسازی رخ داده و موجب تشدید سایر خرابی‌ها از جمله شیارشدگی و شن زدگی در لایه‌های مخلوط آسفالتی می‌شود. بر این اساس در این پژوهش به بررسی تاثیر استفاده از انواع مختلف باطله زغال سنگ به عنوان پسماند فرآیند استخراج (باطله جیگ و فلوتاسیون) آن بر عملکرد مخلوط آسفالتی در مواجهه با پدیده حساسیت رطوبتی پرداخته شده است. پس از انجام آزمایش‌های شناسایی ساختار فیزیکی و شیمیایی باطله‌های زغال سنگ، چهار ترکیب مختلف از مخلوط آسفالتی آزمایشگاهی حاوی این ماده تهیه گردید. باطله‌های زغال سنگ در درصد‌های یکسان به قیر اضافه و آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی و آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز بر روی قیر و آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از باطله زغال سنگ جیگ نسبت به باطله زغال سنگ فلوتاسیون موجب افزایش مولفه قطبی قیر و افزایش چسبندگی می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم بهبود مقاومت در برابر خرابی رطوبتی در نتیجه استفاده از باطله زغال سنگ جیگ را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

پدیده در گسترش سایر خرابی‌ها مانند شیارشدگی، شن زدگی و بالازدگی آسفالت نقش ایفا می‌کند و با کاهش عملکرد و عمر سرویس‌دهی روسازی موجب افزایش هزینه تعمیر و نگهداری روسازی می‌شود [۲]. این نوع خرابی هنگامی رخ می‌دهد که سنگدانه‌ها تمایل بیشتری برای جذب آب نسبت به تمایل آن‌ها برای پوشیده شدن توسط قیر وجود داشته باشد [۳]. راهکارهای زیادی برای بالا بردن مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که اصلاح قیر با توجه به افزودنی و اصلاح کننده‌ها یکی از روش‌های پیشرو در جهت افزایش کیفیت روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری است. توجیه اقتصادی استفاده از نوع افزودنی یکی از عوامل تاثیرگذار در انتخاب افزودنی بوده و همواره ارجحیت بر تاثیر مثبت آن بر عملکرد روسازی اصلاح شده در انتخاب افزودنی دارد. در این تحقیق تاثیر اصلاح قیر توسط افزودنی باطله زغال سنگ جهت پیشگیری از خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی به عنوان موضوع مورد بحث مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه مقدار درصد انتخابی باطله زغال سنگ در این مطالعه مقدار قابل توجهی نبوده ولی می‌تواند گامی در جهت برگشت به

کاهش منابع طبیعی، افزایش روزافزون فعالیت‌های عمرانی و راهسازی و همچنین بحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی باعث شده تا به کارگیری از مواد ضایعاتی در ساخت بتن و روسازی به مسئله‌ای مهم در سال‌های اخیر تبدیل شود. این مسئله محققان زیادی را بر آن داشته تا امکان استفاده از مواد ضایعاتی را در ساخت و تهیه روسازی مورد مطالعه قرار دهند. استفاده از منابع معدنی و مواد ضایعاتی طبیعی به عنوان جایگزین مواد افزودنی پلیمری یکی از راه‌حل‌های کاهش آثار منفی اصلاح کننده‌های مخلوط آسفالتی بر محیط زیست و تولید آسفالت سبز می‌باشد که امروزه گرایش صنعت روسازی به سمت آن بیشتر شده است.

آسفالت تولیدی همواره در معرض انواع خرابی‌ها قرار دارد که خرابی ناشی از رطوبت به عنوان یکی از اصلی‌ترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌شود. خرابی رطوبتی در اثر از بین رفتن چسبندگی و پیوستگی بین قیر و سنگدانه به علت وجود رطوبت رخ می‌دهد [۱]. این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: maryamqolizade1994@gmail.com



چرخه مصرف باطله و حفظ محیط زیست داشته باشد.

در دهه‌های اخیر، مدیریت و استفاده مجدد از مواد زائد و بازیافت شده تا حدودی به دلیل چالش‌های مرتبط با مقررات سخت‌گیرانه محیط زیست ضروری است [۴]. تقاضای قابل توجه مواد جامد قابل بازیافت به همراه به کارگیری برنامه‌های کاربردی از سوی مهندسين عمران نه تنها تاثیرات مخرب زیست محیطی این مواد زائد را کاهش می‌دهد بلکه می‌تواند آن را از محل‌های دفن زباله خارج و به چرخه مصرف مجدد هدایت نماید [۵]. سرباره فولاد و مس به عنوان ضایعات کارخانه‌های فولاد و مس یکی از مواد بازیافتی هستند که امروزه در صنعت روسازی به عنوان سنگدانه روسازی و یا بخشی از آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرباره فولاد به عنوان محصول جانبی کارخانه فولاد با توجه مقاومت و سختی بالا، درصد شکستگی بالا و وزن مخصوص بالا می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار بگیرد [۶] و در این خصوص نیز مطالعات گسترده‌ای انجام شده و نتایج نشان دهنده اثرات مثبت آن در بهبود برخی خرابی‌های رایج در مخلوط آسفالتی می‌باشد [۷]. مطالعات محققان در رابطه با حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فولادی به عنوان بخش درشت‌دانه سنگدانه‌های آهکی توانایی کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را داشته و بهره‌گیری از آن به عنوان کل سنگدانه مخلوط آسفالتی موجب افزایش خرابی رطوبتی می‌شود [۱۱-۸ و ۴].

زغال سنگ با میزان تولید سالانه ۵/۵ میلیارد تن در جهان یکی از فراوان‌ترین منابع تولید انرژی بوده و حجم تولیدی آن در کشور ایران به ۳۱۰ میلیون تن در سال می‌رسد [۱۲ و ۱۳]. در فرآیند فرآوری زغال، زغال سنگ خام از معادن مختلف با یکدیگر مخلوط شده و برای شست‌وشو وارد کارخانه می‌شود. به طور کلی اساس فرآوری زغال سنگ در واحدهای زغال‌شویی را مجموع سه روش سنگ جوری، روش ثقلی (جیگ) و فلو تاسیون تشکیل می‌دهد. پس از خرد شدن زغال سنگ‌های خام توسط دستگاه‌های مخصوص، سرنده شده و بر اساس ابعاد و اندازه به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل زغال‌هایی می‌شود که اندازه‌های آن‌ها بزرگتر از ۸۰ میلی‌متر بوده (خوراک قسمت سنگ جوری) که پس از فرآوری به کنسانتره زغال تبدیل می‌شوند (محصول قسمت سنگ جوری). زغال‌های کوچکتر از ۸۰ میلی‌متر وارد گروه دوم می‌شوند که در گروه دوم زغال سنگ‌های با اندازه ۰/۵ تا ۸۰ میلی‌متر و کوچکتر از ۰/۵ میلی‌متر به ترتیب وارد تجهیزات جیگ و فلو تاسیون شده و طی عملیات فرآوری، قسمتی به کنسانتره و قسمتی به

ضایعات جهت دیو در محل تبدیل می‌شوند. پس از بهره‌وری از زغال سنگ در مصارف گوناگون، حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد آن به صورت باطله دفن یا دیو می‌شود که با هوازنگی باطله زغال سنگ زه‌آب اسیدی تولید شده و با انتقال آن به زمین و آب‌های سطحی متاسفانه محیط با مشکل جدی زیست محیطی روبه‌رو می‌شود. هزینه تهیه و به کارگیری مواد باطله بسیار ناچیز بوده و از طرفی دیوی این ضایعات مشکلات فراوانی برای محیط زیست و منطقه ایجاد می‌نماید [۱۴] که با کاهش دفن و بهره‌گیری آن در صنعت ساختمان و راه می‌توان موجب کاهش آسیب زیست محیطی شد.

در تحقیقات انجام شده توسط کینوتیا که در سال ۲۰۰۹ صورت پذیرفت، با توجه به تاثیر مثبت به کارگیری پسماند زغال سنگ بر دوام و مقاومت نمونه‌های آزمایشگاهی، استفاده از این ماده در تهیه مصالح ساختمانی نظیر بلوک سیمانی، تولید سیمان، تثبیت خاک و در مجموع در مخلوط‌های سیمانی صورت پذیرفت. همچنین کینوتیا پسماند زغال سنگ را در تثبیت لایه‌های اساس و زیر اساس مورد استفاده قرار داد که نتایج حاصله نشان از افزایش مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه داشت [۱۴]. گارسیا و همکاران در سال ۲۰۱۲ پسماند زغال سنگ را به عنوان بخشی از سیمان در مخلوط سیمانی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده به میزان ۲۰ درصد از این ماده به جای سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه را افزایش داده ولی مقاومت ۹۰ روزه را کاهش می‌دهد [۱۵]. چایا و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی روند هیدراتاسیون سیمان و ژل سیمان از ترکیبات خام حاوی شیل نفتی مراکش و ضایعات زغال سنگ به عنوان یک ماده افزودنی پرداختند. یافته‌ها نشان داد که ژل سیمان حاوی شیل و زغال سنگ بیشترین مقاومت فشاری را دارد [۱۶]. فنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به علت تاثیر منفی باطله زغال سنگ بر ترک خوردگی دمای پایین، در تحقیقی این ماده را همراه مواد سیلانی مورد استفاده قرار داد. نتایج آزمایش حاکی از بهبود شیارشدگی در دمای بالا، بهبود ترک خوردگی در دمای پایین و افزایش مقاومت رطوبتی در برابر خرابی رطوبتی بود [۱۷]. مدرس ابار در تحقیقی در سال ۲۰۱۴ خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی بازیافتی حاوی فیلر باطله زغال سنگ جیگ و خاکستر باطله زغال سنگ جیگ را مورد بررسی قرار دادند. فیلر خاکستر باطله زغال سنگ به علت خصوصیات پوزولانی زیاد موجب افزایش استقامت مارشال، افزایش نسبت حساسیت رطوبتی و مدول برجهنگی شد، ولی فیلر باطله زغال سنگ تاثیر منفی بر مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی بازیافتی داشته که به همین دلیل پیشنهاد شد که در کنار فیلر باطله زغال سنگ درصدی از فیلر آهکی نیز استفاده شود [۱۸].

مدت باعث افزایش استحکام مارشال نمونه‌های آسفالتی شده که بیشترین تاثیر آن بر روی نمونه شاهد می‌باشد و بر روی نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ (جدید و قدیم) تاثیر پیر شدگی کمتر بوده و مقدار استحکام مارشال کمتر افزایش می‌یابد. همچنین آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد که پیر شدگی (کوتاه مدت و بلند مدت) باعث تاثیر پذیری بیشتری بر روی نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ می‌شود [۲۳].

امروزه در کنار آزمایش‌های مکانیکی آزمایش‌های شیمیایی از جمله آزمایش انرژی آزاد سطحی و آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز نیز جهت بررسی حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۴]. با این وجود تعداد کمتری از این آزمایش‌ها مورد پذیرش قرار گرفته‌اند و توافق عمومی بر استفاده از یکی از آن‌ها وجود ندارد [۲۵] که بدین علت در این تحقیق از نتایج آزمایش انرژی آزاد سطحی و آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز در کنار آزمایش حساسیت رطوبتی جهت بررسی مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. انرژی آزاد سطحی سنجش کمی میزان چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر را می‌سازد [۲۶]. انتظار می‌رود شناسایی اجزای انرژی آزاد سطحی مواد مورد بررسی، ارزیابی حساسیت رطوبتی و خستگی مخلوط آسفالتی را تسهیل نماید [۲۷]. در تحقیقات انجام شده توسط ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ مشخص گردید که تعیین انرژی آزاد سطحی مواد جامد عمدتاً نیازمند محاسبات و آزمایشات پیچیده است. همچنین نتایج تحقیقات نشان داد که متداول‌ترین روش برای تعیین انرژی آزاد سطحی مواد جامد بر اساس اندازه‌گیری زاویه تماس به دلیل فرآیند آسان آن است [۲۸ و ۲۹]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه استفاده از پارامترهای چسبندگی و پیوستگی بر اساس روش‌های انرژی آزاد سطحی جهت ارزیابی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی صورت پذیرفته است. چنگ در سال ۲۰۰۲ مطالعه جامعی بر روی مفاهیم اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی و کاربرد آن در روسازی‌های آسفالتی انجام داد. در واقع این پژوهش اولین پژوهشی است که در آن به استفاده از مفاهیم انرژی آزاد سطحی برای تعیین خرابی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. ایشان در رساله خود از مفهوم انرژی آزاد سطحی برای کمک به تعیین سازگارترین سیستم قیر-سنگدانه برحسب چسبندگی استفاده کرده است [۳۰]. هسین در سال ۲۰۰۶ در پژوهش خود ابتدا به توسعه روش‌های اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه پرداخت. در ادامه به بررسی ارتباط بین پارامترهای ترمودینامیک، که از اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها به دست آمده بودند، و پتانسیل حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت [۳۱].

این نتیجه حاصل استفاده از باطله زغال سنگ به عنوان فیلر بوده است که ممکن است هنگام استفاده از باطله زغال سنگ به عنوان افزودنی اصلاح کننده قیر نتایج متفاوتی دیده شود. در تحقیق دیگر مدرس و همکاران سال ۲۰۱۵ از انواع فیلر در کنار فیلر باطله زغال سنگ و خاکستر باطله جهت بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی استفاده شد. در این خصوص آزمایشات استقامت مارشال، نسبت حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی انجام گرفت که نتایج تاثیر مثبت فیلر خاکستر باطله زغال سنگ و فیلر باطله زغال سنگ را نسبت به فیلر سیمانی، فیلر ژئولیت و فیلر آهکی نشان داد. همچنین از نتایج قابل توجه این تحقیق تاثیر به سزای خاکستر باطله زغال سنگ و باطله زغال بر روی عمر خستگی مخلوط آسفالتی به میزان ۳۷۹ و ۱۹۴ درصد نسبت به نمونه شاهد بود [۱۹]. عاملی و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای بررسی تاثیر خاکستر باطله زغال سنگ و خاکستر پوسته برنج در مخلوط آسفالتی درشت‌دانه از آزمایش مکانیکی مخلوط آسفالتی و رئولوژیکی قیر استفاده کردند. در این تحقیق خاکستر باطله زغال سنگ و خاکستر پوسته برنج با درصد‌های مختلف به عنوان فیلر استفاده شدند و نتایج نشان داد که تمام خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت مارشال، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی مخلوط‌های حاوی فیلر خاکستر باطله زغال سنگ به طور جزئی کاهش می‌یابد و با افزایش درصد افزودنی مقدار تاثیر منفی آن بیشتر می‌شود [۲۰]. شفابخش و همکاران در سال ۲۰۲۲ جهت بررسی تاثیر فیلرهای معدنی و باطله بر روی رفتار خستگی مخلوط آسفالتی داغ از آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای استفاده کرد و این تحقیق نشان داد که فیلرهای معدنی با کاهش آلودگی محیط زیستی می‌تواند برای بهبود رفتار آسفالت داغ مفید باشد. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که فیلر باطله زغال سنگ در کرنش‌های ۴۰۰ و ۶۰۰ میکرو کرنش به ترتیب موجب افزایش ۵۵ و ۷۲ درصدی عمر خستگی مخلوط آسفالتی می‌شود [۲۱]. نتایج تحقیق پی و همکاران همانند نتایج تحقیقات مدرس و عاملی بوده و نشان داد که خاکستر باطله زغال سنگ به طور جزئی تاثیر منفی بر روی استحکام مارشال و مقاومت شیارشدگی داشته ولی در کنار آن آزمایش خمشی دمای پایین نشان داد که این افزودنی می‌تواند باعث کاهش حالت الاستیسیته و افزایش ویسکوزیته در دمای پایین گردد و در نتیجه عملکرد دمای پایین آن را بهبود ببخشد [۲۲]. عباس تبار و ایزدی در سال ۲۰۱۸ در تحقیقات خود برای بررسی عملکرد دراز مدت باطله زغال سنگ، سه حالت پیر شدگی کوتاه مدت، بلند مدت و حالت بدون پیر شدگی مخلوط‌های آسفالتی را مدنظر قرار داده و مورد بحث و بررسی قرار دادند. نتایج مارشال نشان داد که پیر شدگی به خصوص پیر شدگی بلند

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی ۶۰/۷۰

Table 1. The properties of 60/70 bitumen

نوع آزمایش	روش استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
درجه نفوذ (0.1mm)	ASTM D5	۶۰-۷۰	۶۸
نقطه نرمی (°C)	ASTM D36	۴۹-۵۶	۴۸
شکل پذیری (cm)	ASTM D113	حداقل ۱۰۰	۱۴۱/۵
درجه اشتعال (°C)	ASTM D92	حداقل ۲۳۲	۲۹۰
چگالی (gr/cm ³)	ASTM D70	-	۱/۰۱۸

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

Table 2. Physical properties of aggregates

مصالح	نوع آزمایش	روش استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
مصالح سنگی درشت‌دانه	سایش لس آنجلس (درصد)	ASTM C535	حداکثر ۳۰	۱۴
	درصد شکستگی در یک وجه (درصد)	ASTM-D5821	حداقل ۹۵	۹۷
	درصد شکستگی در دو وجه (درصد)	ASTM-D5821	حداقل ۹۰	۹۳
	وزن مخصوص درشت‌دانه (gr/cm ³)	ASTM D127		۲/۵۱
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۶/۲
مصالح سنگی ریزدانه	ذرات سوزنی و پولکی شکل (درصد)	AASHTO T4791	حداکثر ۱۰	۰/۴
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۱
	وزن مخصوص ریزدانه (gr/cm ³)	ASTM D128		۲/۶۷
	درصد شکستگی مصالح ریزدانه (درصد)	ASTM C1252	حداقل ۴۵	۵۲
	ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D2419	حداقل ۴۵	۶۷

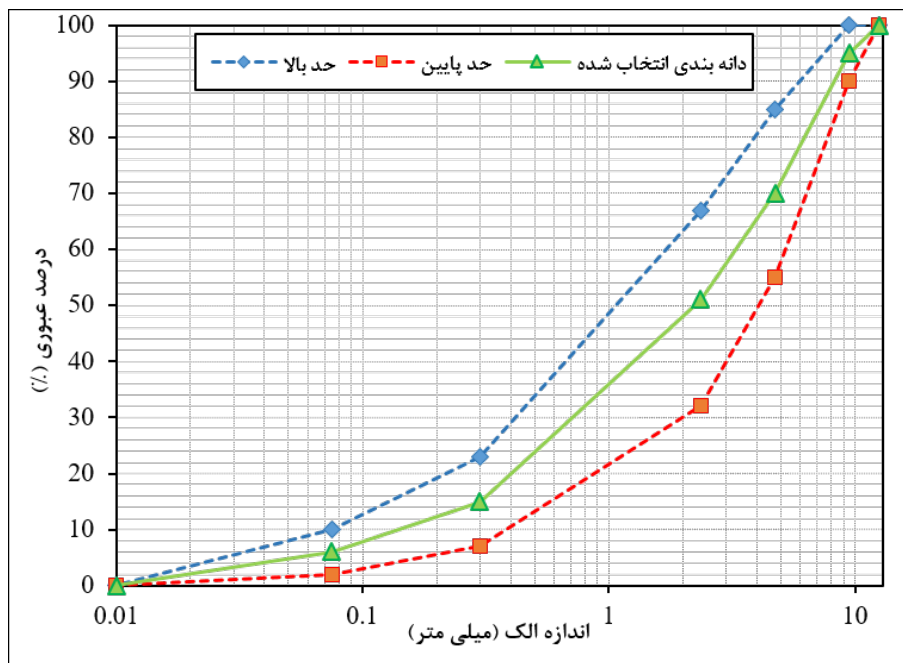
پیوستگی و چسبندگی مشخص گردد. بر اساس نتایج حاصل، کاهش اثرات زیست محیطی و بهبود دوام آسفالت از خروجی‌های تحقیق حاضر می‌باشند.

۲- مصالح

۲-۱- قیر مصرفی و مصالح سنگی

به منظور تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی قیر مصرفی مورد استفاده، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ بوده که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده و خصوصیات آن در جدول ۱ ارائه شده است. مصالح سنگی مصرفی در این پژوهش از مصالح سنگی کوهی (سنگدانه آهکی) موجود در معدن چالدران با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده که خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی در جدول ۲ آورده شده است. برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی از دانه‌بندی شماره ۵ آیین‌نامه روسازی ایران که برای ساخت لایه‌های رویه پیشنهاد شده، طبق شکل ۱ استفاده شده است.

هوسان در سال ۲۰۱۱ در ادامه مطالعات پیشین خود به بررسی استفاده از روش انرژی آزاد سطحی در شناسایی پتانسیل مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت پرداخت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که اصلاحات ایجاد شده بر روی قیر می‌تواند تأثیرات منفی یا مثبت قابل توجهی بر روی مولفه‌های انرژی آزاد سطحی و انرژی چسبندگی داشته باشد [۳۲]. هدف از انجام پژوهش حاضر، استفاده از باطله زغال سنگ به عنوان افزودنی اصلاح کننده قیر و بررسی تأثیر آن بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌باشد. علاوه بر آزمایش حساسیت رطوبتی در این پژوهش از آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی و آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز نیز جهت بررسی حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری چسبندگی قیر اصلاح شده با باطله زغال سنگ از رویکرد مفهوم انرژی آزاد سطحی استفاده شده است تا با کمک آن سازگارترین سیستم اتصال قیر و سنگدانه برحسب مقاومت



شکل ۱. حدود منحنی دانه بندی مصالح سنگی

Fig. 1. The limits of the gradation curve of the aggregate



شکل ۲. باطله های زغال سنگ مورد استفاده در این پژوهش (الف) فلوتاسیون رد شده از الک ۲۰۰ و (ب) جیگ به شکل کلوخه ای

Fig. 2. Coal Wastes of used in this research (A) Flotation passed through sieve No. 200 and B) Jig in the form of lumps)

۲-۲- افزودنی مورد استفاده

تحقیق مطابق با دپوی موجود در محل از باطله زغال سنگ تولیدی جدید و قدیم استفاده شده که در مجموع به تعداد ۴ حالت یعنی فلوتاسیون قدیم، فلوتاسیون جدید، جیگ قدیم و جیگ جدید از باطله ها به عنوان افزودنی در اصلاح قیر مورد آزمایش قرار گرفته شده است. در جدول ۳ ترکیبات شیمیایی باطله زغال سنگ فلوتاسیون و جیگ نشان داده شده که مطابق آن مشاهده می شود این افزودنی ها دارای خصوصیات پوزولانی می باشد.

در این پژوهش باطله های زغال سنگ مطابق شکل ۲ از محل دپوی موجود در کارخانه زغال شویی البرز مرکزی تهیه و به عنوان افزودنی در قیر استفاده شده است. باطله های زغال سنگ محل، باقی مانده از فرآوری زغال سنگ خام به دو روش تقلی (روش جیگ) و عملیات فلوتاسیون می باشند که به دو صورت باطله جیگ و فلوتاسیون نام گذاری می شوند. در این

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی باطله زغال سنگ فلوتاسیون و جیگ

Table 3. Chemical composition of Coal Flotation and Coal Jig Waste

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₃	L.O.I
درصد باطله فلوتاسیون	۳۴/۸۰	۱۴/۵۳	۳/۸۹	۰/۸۷	۰/۵۱	۰/۲۷	۲/۳۹	۰/۹۸	۰/۰۲	۰/۱۷	۴۱/۶۶
درصد باطله جیگ	۳۳/۲۰	۱۴/۰۱	۳/۴۵	۰/۸۶	۰/۳۸	۰/۲۲	۲/۳۱	۰/۹۵	۰/۰۲	۰/۳۴	۴۴/۲۶



شکل ۳. الف) نمونه های قیری اصلاح شده، ب) نمونه های آسفالتی ساخته شده با باطله زغال سنگ

Fig. 3. A) Modified bitumen samples, B) Asphalt samples made with Coal Waste

مادون قرمز انجام شد. همچنین آزمایش انرژی آزاد سطحی جهت بررسی پیوند قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش حساسیت رطوبتی نیز بر روی نمونه های آسفالتی (شکل ۳-ب) به منظور سنجش مقاومت رطوبتی نمونه ها استفاده شد.

۳-۱- آزمایش های قیر

جهت بررسی رئولوژیکی قیر پایه و قیرهای اصلاح شده باطله های زغال سنگ، آزمایش های قیر از جمله آزمایش درجه نفوذ (ASTM D5)، نقطه نرمی (ASTM D36)، ویسکوزیته چرخشی (ASTM D4402) انجام شد. به منظور ارزیابی تاثیر اصلاح کننده انواع باطله زغال سنگ بر روی حساسیت حرارتی قیرهای مورد آزمایش شاخص نفوذ مورد محاسبه قرار گرفت. ویسکوزیته قیر از مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر کارایی مخلوط در حین پخش و تراکم مخلوط آسفالتی می باشد که بدین منظور آزمایش ویسکوزیته چرخشی در دو دمای ۱۳۵ و ۱۶۵ درجه سانتی گراد انجام شد.

۳-۲- نحوه اختلاط قیر و افزودنی ها

مطالعات صورت گرفته در زمینه ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی باطله زغال سنگ، به کارگیری درصد وزنی حدود ۷ را برای اضافه نمودن ماده افزودنی به قیر پیشنهاد داده اند [۳۳ و ۱۸] که در این تحقیق نیز این مقدار مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید قیرهای اصلاح شده ابتدا قیر پایه تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد گرم شده سپس ۴ نوع ماده افزودنی (فلوتاسیون قدیم، فلوتاسیون جدید، جیگ قدیم و جیگ جدید) در درصد مورد نظر به آن اضافه می شود. عمل اختلاط در میکسر با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه صورت گرفته است.

۳-۳- روش آزمایش

بعد از اصلاح قیر توسط باطله های زغال سنگ (شکل ۳-الف) آزمایش های قیر بر روی نمونه های قیری انجام شده سپس به منظور بررسی و شناسایی گروه های عاملی در قیر و تغییرات ترکیبات شیمیایی به وجود آمده در قیر اصلاح شده بر اثر افزودن باطله های زغال سنگ، آزمایش طیف سنجی

جدول ۴. پارامتر انرژی سطحی مایع‌های معلوم

Table 4. SFE components of probe liquids

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (mJ/m ²)					
مایع آزمایش	مولفه اسیدی	مولفه بازی	مولفه قطبی	مولفه غیرقطبی	کل
	γ^+	γ^-	γ^{AB}	γ^{LW}	γ^T
آب	۲۵/۵۰	۲۵/۵۰	۵۱	۲۱/۸۰	۷۲/۸۰
دی-یدو-متان	۰	۰	۰	۵۰/۸۰	۵۰/۸۰
اتیلن گلیکول	۳	۳۱	۱۹/۲۸	۲۹/۰۱	۴۸/۲۹

۳-۲- آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز

دستگاه سری فوریه مادون قرمز یک ابزار قوی جهت شناسایی عامل‌های شیمیایی موجود در قیر و تعیین ساختار اجزا آن‌ها می‌باشد. طیف مادون قرمز معمولاً از نمونه‌هایی به شکل فیلم که ضخامتی بسیار نازک دارند به دست می‌آیند. برای نمونه‌هایی که لایه فیلم ضخیم دارند و یا به صورت گرانول می‌باشند، می‌توان به دو روش نمونه را به ضخامت مورد نیاز آزمایش رساند که در روش اول نمونه‌ها تا دمای نرم شدگی حرارت داده شده و پرس می‌شوند تا به ضخامت مورد نیاز جهت انجام آزمایش برسند و در روش دوم نمونه‌ها در حلال مناسب حل شده و با قرار دادن بر روی قرص پتاسیم بروماید و تبخیر حلال، فیلم نازک نمونه به دست می‌آید. در این مطالعه آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز به منظور شناسایی گروه‌های عاملی موجود در قیر پایه و اصلاح شده با باطله‌های زغال سنگ و همچنین تغییرات ترکیبات شیمیایی قیرهای اصلاح شده در طول موج 1400 cm^{-1} تا 1400 cm^{-1} با دقت رزولوشن 4 cm^{-1} انجام می‌شود.

۳-۳- آزمایش انرژی آزاد سطحی

تئوری انرژی آزاد سطحی بیان می‌کند که مولکول‌های داخل یک مایع یا جامد در فاصله نزدیکی کنار یکدیگر جمع شده‌اند و در حالت پایدار با خودشان قرار دارند، در حالی که مولکول‌های سطحی نیروهای غیرمتعادلی دارند. این نیروهای غیرمتعادلی سبب می‌شوند که مولکول‌های سطحی جذب مواد دیگر شوند. برای یک مایع، این موضوع سبب ایجاد یک لایه از مولکول‌ها با چگالی کمتر در سطح می‌شود. این لایه باعث ایجاد

کششی در سطح می‌شود که کشش سطحی نامیده می‌شود. فرض می‌شود که این کشش در همه جهات یکسان باشد. برای یک جامد، مولکول‌ها، آزادی حرکتی ندارند و بنابراین تمایل به واکنش با مواد دیگر در روی سطح جامدات برای متعادل کردن این نیروها به صورت بالقوه وجود دارد [۳۳]. چندین تئوری، انرژی آزاد سطحی مواد را بر اساس ساختار مولکولی‌شان تشریح می‌کنند و از مهم‌ترین تئوری‌هایی که به صورت گسترده برای تشریح مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است، می‌توان به تئوری اسیدی-بازی اشاره کرد [۳۵ و ۳۴]. انرژی آزاد سطحی به عنوان کار مورد نیاز برای به وجود آوردن یک مساحت واحد صفحه جدید تحت شرایط خلا تعریف می‌شود [۳۶]. در این مطالعه اجزای انرژی سطحی مخلوط قیر از طریق اندازه‌گیری مقدار زاویه تماسی با استفاده از روش سسیل دراپ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زاویه تماسی از سه مایع مختلف معلوم آب، اتیلن گلیکول و دی‌یدو متان استفاده شد که مشخصات مولفه انرژی سطحی آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن سه نوع سنگدانه آهکی، گراول و گرانیات که مشخصات مولفه انرژی سطحی آن‌ها در جدول آمده است، در مجموع ۱۵ نوع حالت در نظر گرفته شد. جهت اطمینان از تکرارپذیری نتایج، هر قطره مایع سه مرتبه تکرار و اندازه‌گیری شد. بعد از اندازه‌گیری زاویه تماسی، مولفه انرژی آزاد سطحی قیرهای مجهول از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۳۷].

$$\gamma_{Li} (1 + \cos \theta_i) = 2(\sqrt{\gamma_{Li}^{LW}} x_1 + \sqrt{\gamma_{Li}^-} x_2 + \sqrt{\gamma_{Li}^+} x_3) \quad (1)$$

جدول ۵. پارامتر انرژی سطحی سنگدانه‌ها [۳۸-۴۰]

Table 5. SFE components of aggregates

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (mJ/m ²)					سنگدانه
کل γ^T	مولفه غیرقطبی γ^{LW}	مولفه قطبی γ^{AB}	مولفه بازی γ^-	مولفه اسیدی γ^+	
۲۷۹/۲۱	۵۱/۴۰	۲۲۷/۸۱	۷۴۱/۴۰	۱۷/۵۰	آهکی
۳۵۶/۶۹	۵۷/۵۰	۲۹۹/۱۹	۹۷۳	۲۳	گراول
۳۹۹/۱۸	۴۴/۳۰	۳۵۸/۸۸	۴۶/۳۷	۶۷۸/۹۸	گرانیت

شدگی شناخته می‌شود و با استفاده از پارامتر SFE از معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آیند. مقدار ضریب انرژی نیز از تقسیم کار چسبندگی بر کار جدا شدگی مطابق معادله (۶) به دست می‌آید.

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW} \gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+ \gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^- \gamma_B^+} \quad (۴)$$

$$W_{ABW}^{Wet} = \gamma_{AW} + \gamma_{BW} - \gamma_{AB} \quad (۵)$$

$$ER = \left| \frac{W_{AB}}{W_{ABW}^{Wet}} \right| \quad (۶)$$

زیرنویس‌های A، B و W به ترتیب مربوط به سنگدانه، مخلوط قیر و آب می‌باشد. γ_A^{LW} و γ_B^{LW} به ترتیب مولفه‌های لیفشز و اندروالز سنگدانه و قیر می‌باشد. γ_A^+ ، γ_B^+ ، γ_A^- و γ_B^- به ترتیب مولفه‌های اسید لوئیس سنگدانه و قیر و مولفه‌های باز لوئیس سنگدانه و قیر می‌باشند. همچنین سه پارامتر γ_{AW} ، γ_{BW} و γ_{AB} به ترتیب انرژی سطحی بین سنگدانه-آب، مخلوط قیر-آب و سنگدانه-مخلوط قیری می‌باشد.

۳-۴- آزمایش تنش کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

آزمایش کشش غیرمستقیم به منظور تعیین مقاومت کششی مخلوط آسفالتی و ارزیابی حساسیت رطوبتی استفاده می‌شود. در این آزمایش نمونه استوانه‌ای به صورت قطری تحت بار فشاری وارد بر سطح جانبی قرار می‌گیرد. این نحوه بارگذاری موجب تشکیل تنش کششی نسبتاً یکنواختی

زیر نویس L_i مایع‌های معلوم هست که مشخصات انرژی سطحی آن مشخص است. θ_i زاویه تماسی مایع معلوم با صفحه جامد می‌باشد γ_{Li} ، γ_{Li}^{LW} ، γ_{Li}^- و γ_{Li}^+ به ترتیب انرژی آزاد کل مایع معلوم، مولفه لیفشز و اندروالز مایع معلوم، مولفه باز لوئیس و مولفه اسید لوئیس مایع معلوم می‌باشد. جذر ریشه دوم مولفه‌های انرژی سطحی قیرهای مجهول هستند.

انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای بر اساس نوع نیروهای مولکول‌های سطحی به سه مولفه تقسیم می‌شود. این مولفه‌ها عبارتند از:

الف- مولفه غیرقطبی یا لیفشیتز-ون در والز، ب- مولفه اسیدی لوئیس و ج- مولفه بازی لوئیس

انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب این مولفه‌ها از طریق معادله (۲) به دست می‌آید:

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \quad (۲)$$

که در آن γ انرژی آزاد سطحی کل ماده، γ^{LW} مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی و γ^{AB} مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی است. بر طبق اصول ارائه شده توسط ون اوس مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی طبق رابطه (۳) از پارامتر اسید لوئیس γ^+ و باز لوئیس γ^- تشکیل شده است.

$$\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \quad (۳)$$

بر اساس تعریف انرژی آزاد سطحی، کار چسبندگی (WAB) بین مخلوط قیر و سنگدانه و کار چسبندگی در حضور آب W_{AB}^{wet} که به عنوان کار جدا

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های متداول بر روی قیر پایه و اصلاح شده

Table 6. The results of bitumen tests on neat and modified bitumens

نمونه‌های قیری	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)	نقطه نرمی (سانتی‌گراد)	ویسکوزیته دورانی (میلی پاسکال بر ثانیه)	
			۱۶۵°C	۱۳۵°C
کنترلی	۶۸	۴۸	۱۰۰	۴۶۰
فلوتاسیون جدید	۶۶/۳	۶۳	۱۱۹	۵۰۹
فلوتاسیون قدیم	۶۴/۲	۶۷	۱۲۶	۵۱۸
جیگ جدید	۶۵/۶	۶۱/۵	۱۲۱	۵۱۳
جیگ قدیم	۶۳/۱	۶۸	۱۲۹	۵۲۱

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (۸)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش‌های قیر

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر در جدول ۶ آورده شده است. طبق جدول مشاهده می‌شود که افزودن باطله فلوتاسیون و جیگ باعث کاهش جزئی درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی می‌شود که در این میان باطله جیگ قدیم درجه نفوذ کمتری را نشان می‌دهد. به طور مثال افزودن جیگ قدیم درجه نفوذ قیر پایه را از مقدار ۶۸ به مقدار ۶۳/۱ (۷/۲٪) می‌دهد. نقطه نرمی قیر اصلاح شده با جیگ قدیم نیز از مقدار ۴۸ به مقدار ۶۸ به اندازه ۴۱/۷ درصد افزایش می‌دهد. مطابق جدول ۶ باطله زغال سنگ (فلوتاسیون و جیگ) کاهش حساسیت حرارتی قیر را به دنبال دارد و باعث تولید قیر با شاخص نفوذ مناسب می‌شود.

۴-۲- طیف‌سنجی مادون قرمز

نتایج آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز بر روی نمونه قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده با باطله زغال سنگ فلوتاسیون و جیگ جدید در شکل‌های ۴ الی ۶ آورده شده است. تفسیر تمامی طول موج‌های موجود در نمونه‌ها به طور خلاصه در جدول ۷ آورده شده است. مطابق شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که طیف نمونه‌های باطله زغال سنگ مشابه یکدیگر بوده ولی در

در امتداد قطر نمونه و شکسته شدن آن در این امتداد می‌شود. تنش کششی ایجاد شده در مرکز نمونه از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$Its = \frac{2P}{\pi.D.t} \quad (۷)$$

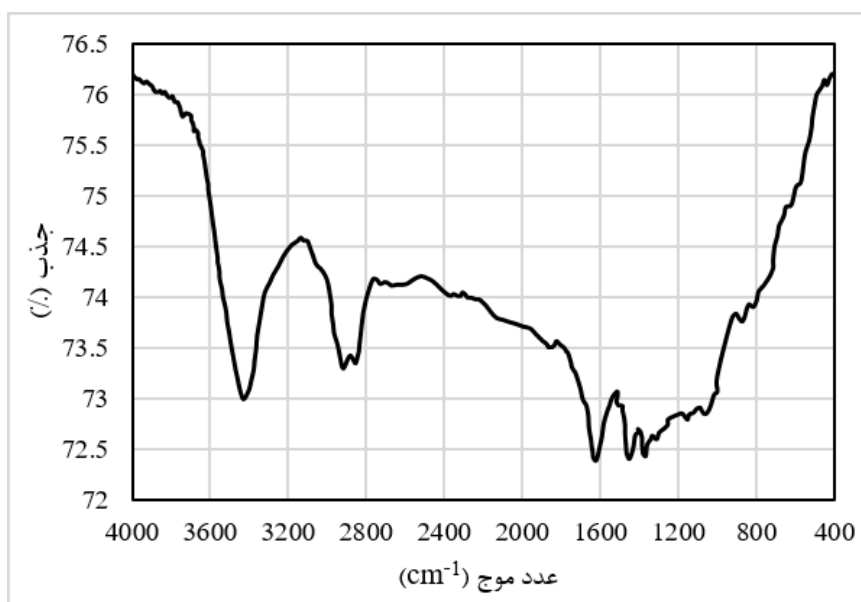
در این رابطه P برابر با حداکثر نیروی وارد بر نمونه کیلوپاسکال، t ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر، D برابر با قطر نمونه برحسب میلی‌متر است.

جهت اندازه‌گیری مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی، این آزمایش طبق شرایط لاتمن اصلاح شده مطابق استاندارد AASHTO T283 انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش لازم است که نمونه‌های ساخته شده به دو گروه خشک و اشباع تقسیم می‌شوند. جهت اشباع کردن نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها با استفاده پمپ خلأ تحت فشار منفی قرار می‌گیرند که به درصد اشباع ۷۰ تا ۸۰ درصد برسند. برای اعمال سیکل ذوب و یخ، نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت درون فریزر با دمای ۱۸°C- قرار می‌گیرند و سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون حمام آب با دمای ۶۰°C قرار داده می‌شوند. نمونه‌های خشک نیز به مدت ۲ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۲۵°C قرار گرفته و سپس بارگذاری می‌شوند و بیشترین باری را که نمونه تحمل می‌کند ثبت می‌شود. بعد از مشخص شدن بار ماکزیمم با استفاده از رابطه (۷) مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی به دست آمده و شاخص حساسیت رطوبتی طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

جدول ۷. گروه عاملی موجود در نمونه‌های قیر

Table 7. The functional group present in bitumen samples

توضیحات	نوع پیوند	محدوده پیک‌ها
ارتعاش کششی مربوط به ترکیبات سولفوکسید	S=O	۱۰۳۰
ارتعاش کششی مربوط به گروه استر	C-O	۱۰۷۲
مربوط به گروه آلفاتیک	CH ₃ و CH ₂	۱۴۵۸
نشان دهنده وجود آسفالتن و اجزای آروماتیکی	C=C	۱۶۰۰- ۱۶۸۰
ارتعاش کششی مربوط به گروه آلدهید	C=O	۱۶۴۰- ۱۶۹۰
ارتعاش کششی مربوط به گروه کربونیل	C=O	۱۷۰۰- ۱۷۲۰
ارتعاش کششی مربوط به گروه آلفاتیک	C-H	۲۸۵۰- ۲۹۱۵
ارتعاش کششی مربوط به گروه آمید و ترکیبات الکل	O-H و N-H	۳۱۰۰- ۳۶۰۰

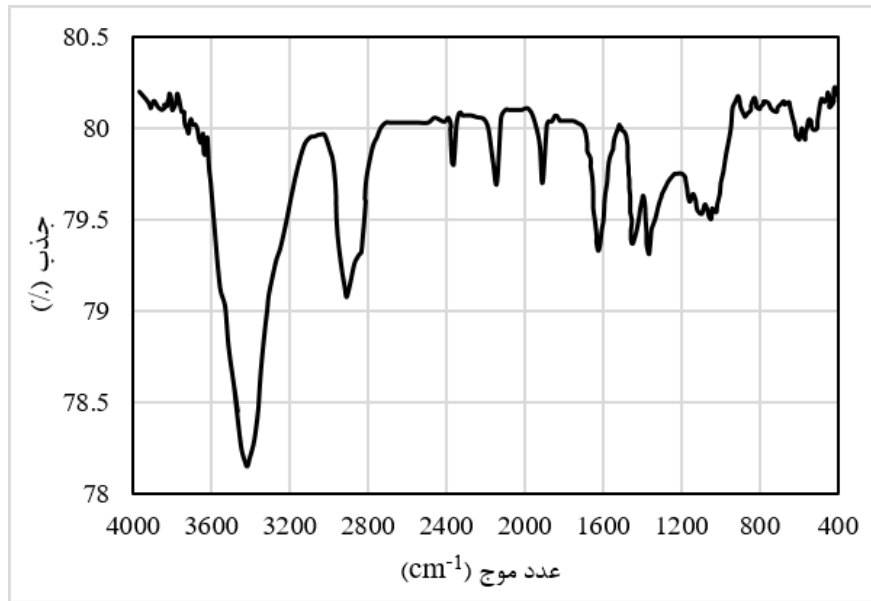


شکل ۴. طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه کنترلی

Fig. 4. FTIR spectra of the control bitumen

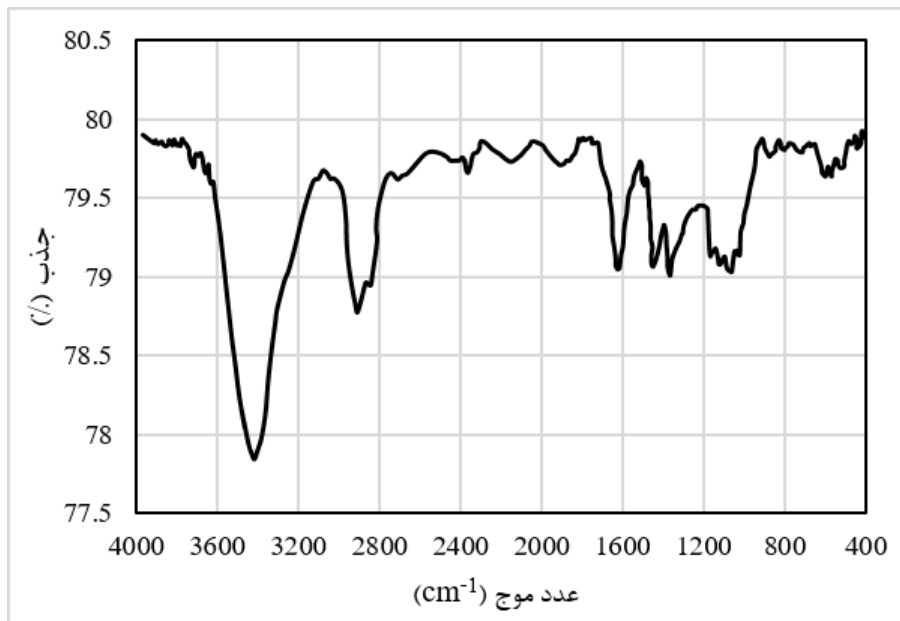
عاملی سولفوکسید در نمونه اصلاح شده با جیگ کمتر از فلوتاسیون می‌باشد. طول موج محدوده پیک $3100-3600 \text{ cm}^{-1}$ مرتبط با گروه آمید (N-H) و ترکیبات الکل (هیدروکسیل O-H) از گروه عاملی کربوسیلیک اسید می‌باشد. گروه‌های عاملی که با پیوند هیدروژنی همراه هستند با آب بسیار واکنش پذیرند، بنابراین چنین گروه‌های عاملی ممکن است مسئول حساسیت رطوبتی در یک مخلوط آسفالتی باشند [۴۲] {Haghshenas, ۲۰۱۸ #۹۷}.

برخی پیک‌های مشترک شدت جذب متفاوتی دارند. پیک محدوده طول موج 1030 cm^{-1} و پیک‌های موجود در محدوده موج $1640-1710 \text{ cm}^{-1}$ به ترتیب مربوط به ترکیبات سولفوکسید و گروه کربونیل می‌باشد که در بحث پیر شدگی قیر و همچنین مقاومت رطوبتی نقش مهمی دارند که در برخی کارهای پژوهشی گروه عاملی سولفوکسید به عنوان معیار سنجش حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار گرفته است [۴۱ و ۲۴]. با مقایسه دو طیف باطله زغال سنگ مشاهده می‌شود که شدت جذب در طول موج مرتبط با گروه



شکل ۵. طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه اصلاح شده با باطله زغال سنگ جیگ

Fig. 5. FTIR spectra of the modified sample with Coal Jig Waste



شکل ۶. طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه اصلاح شده با باطله زغال سنگ فلوئوتاسیون

Fig. 6. FTIR spectra of the modified sample with Coal Flotation Waste

جدول ۸. مولفه‌های انرژی سطحی آزاد قیرهای اصلاح شده

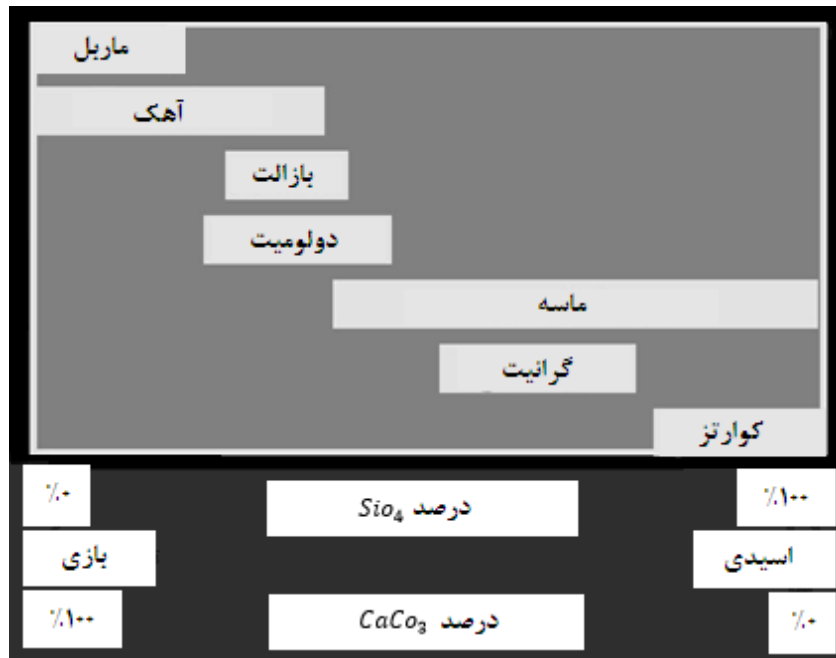
Table 8. SFE components of modified bitumens

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (mJ/m^2)					
کل	مولفه غیرقطبی	مولفه قطبی	مولفه بازی	مولفه اسیدی	نمونه‌های قیری
γ^T	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^-	γ^+	
۱۵/۶۹	۱۴/۲۲	۱/۴۷	۰/۲۱	۲/۵۸	کنترلی
۱۴/۴۶	۱۳/۵۲	۱/۱۲	۰/۱۲	۲/۶۳	فلوتاسیون جدید
۱۴/۴۸	۱۴/۰۸	۱/۴۰	۰/۱۹	۲/۵۸	فلوتاسیون قدیم
۱۶/۲۱	۱۴/۶۸	۱/۵۳	۰/۲۳	۲/۵۷	جیگ جدید
۱۶/۹۲	۱۵/۱۰	۱/۸۲	۰/۳۳	۲/۵۲	جیگ قدیم

۴-۳- انرژی آزاد سطحی

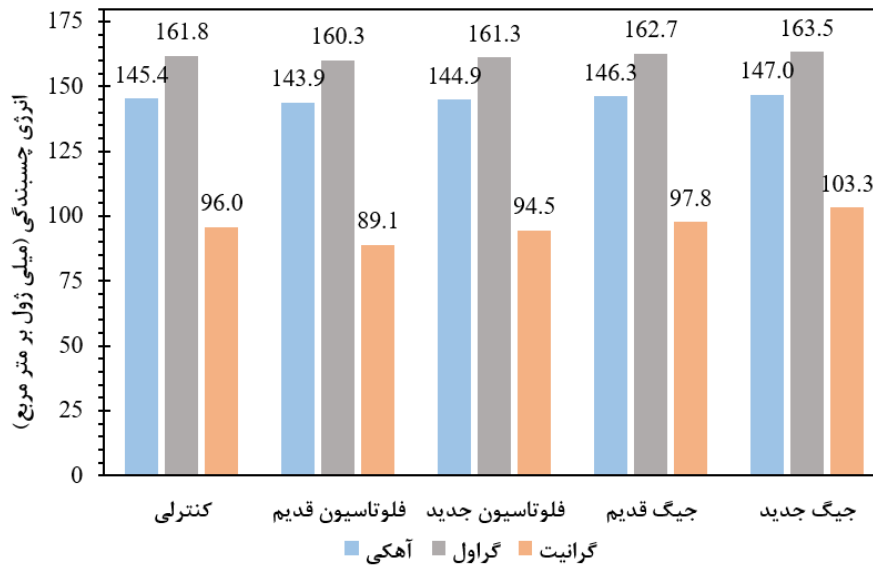
مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر خالص و قیرهای حاوی افزودنی باطله زغال سنگ بر اساس روش سسیل دراپ از طریق اندازه‌گیری زاویه تماسی مورد ارزیابی قرار گرفتند. همانطور که از داده‌های جدول ۸ مشخص است، مولفه اسیدی قیر خالص در برابر مولفه بازی آن بسیار بزرگتر است. این مطلب باعث می‌شود تا قیر خصوصیات اسیدی بیشتری داشته باشد. خصوصیات اسیدی قیر باعث شکل‌گیری پیوندهای قوی‌تری با مواد بازی مانند سنگدانه‌های سنگ آهک می‌شود. با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که افزودن باطله زغال سنگ مقدار بازی بودن قیر را تا حدودی تغییر داده که در این میان باطله فلوتاسیون موجب کاهش این خصوصیت و باطله جیگ باعث افزایش میزان بازی قیر می‌شود. با توجه به این که سنگدانه‌های مورد استفاده در روسازی مطابق شکل ۷ خصوصیات اسیدی و بازی متفاوتی دارند باید توجه کرد که تمایل چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها متفاوت می‌باشد، بنابراین تعیین و کنترل مؤلفه‌های اسیدی و بازی در مخلوط آسفالتی از پارامترهای مهمی به شمار می‌آید. مطابق جدول می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی قیر مشابه تغییرات بازی و اسیدی شدن قیر می‌باشد به طوری که باطله جیگ مقدار مولفه قطبی قیر را افزایش می‌دهد و باطله فلوتاسیون نتیجه عکس بر این مولفه دارد. در مورد تاثیر مثبت یا منفی این پارامتر در چسبندگی قیر-سنگدانه نمی‌توان با قاطعیت اظهار نظر داد ولی تنها مطلب قابل ذکر این است که افزایش در خصوصیات قطبی قیر باعث می‌شود تا میل به چسبندگی آن به مواد قطبی مانند سنگدانه و آب افزایش یابد [۴۳ و ۴۴]. نتایج ستون انرژی آزاد سطحی کل نشان می‌دهد استفاده از باطله زغال سنگ جیگ باعث شده است تا این

پارامتر افزایش یابد. انرژی آزاد سطحی کل رابطه‌ی مستقیم با انرژی آزاد پیوستگی دارد بدین معنا که انرژی بیشتری نیاز است تا ترک مشخصی در غشای قیر ایجاد شود و افزایش انرژی مورد نیاز برای گسیختگی در غشای قیر باعث کاهش احتمال گسیختگی پیوستگی می‌شود. کار چسبندگی پارامتر مهمی در توصیف پتانسیل مقاومت رطوبتی است که به عنوان انرژی مورد نیاز جهت جدا کردن مخلوط قیری از واحد سطح سنگدانه به صفحه جدید تعریف می‌شود [۴۵]. مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود که مخلوط قیری اصلاح شده با باطله فلوتاسیون نسبت به مخلوط کنترلی پایه مقدار انرژی چسبندگی کمتری با هر سه نوع سنگدانه دارد. به عبارت بهتر افزودن باطله فلوتاسیون (جدید و قدیم) انرژی چسبندگی را در مخلوط‌های قیری کاهش می‌دهد. برخلاف باطله فلوتاسیون قیرهای اصلاح شده با باطله جیگ (قدیم جدید) تاثیر مثبتی بر روی انرژی چسبندگی داشته و همواره موجب افزایش این پارامتر می‌شود. مطابق جدول ۸ با توجه به افزایش میزان بازی شدن قیر توسط جیگ مشاهده می‌شود که بیشترین تغییرات مثبت بر روی انرژی پیوستگی بر روی سنگدانه گرانیتی (دارای خصوصیات اسیدی بیشتر نسبت به سایر سنگدانه‌ها) اتفاق می‌افتد و همچنین پیوند قیر اصلاح شده با سنگدانه آهکی کمترین تغییرات مثبت نسبت به نمونه کنترلی را دارد. با بررسی تاثیر باطله زغال سنگ بر روی انرژی چسبندگی مخلوط قیر و سنگدانه مشاهده می‌شود که با افزودن باطله جیگ تمامی نمونه‌های اصلاح شده با آن مقدار انرژی چسبندگی بیشتری نسبت به نمونه‌های کنترلی دارند. در نمونه‌های حاوی جیگ، نمونه باطله جیگ جدید و جیگ قدیم بیشترین انرژی چسبندگی با هر سه نوع سنگدانه را نسبت به نمونه کنترلی دارند.



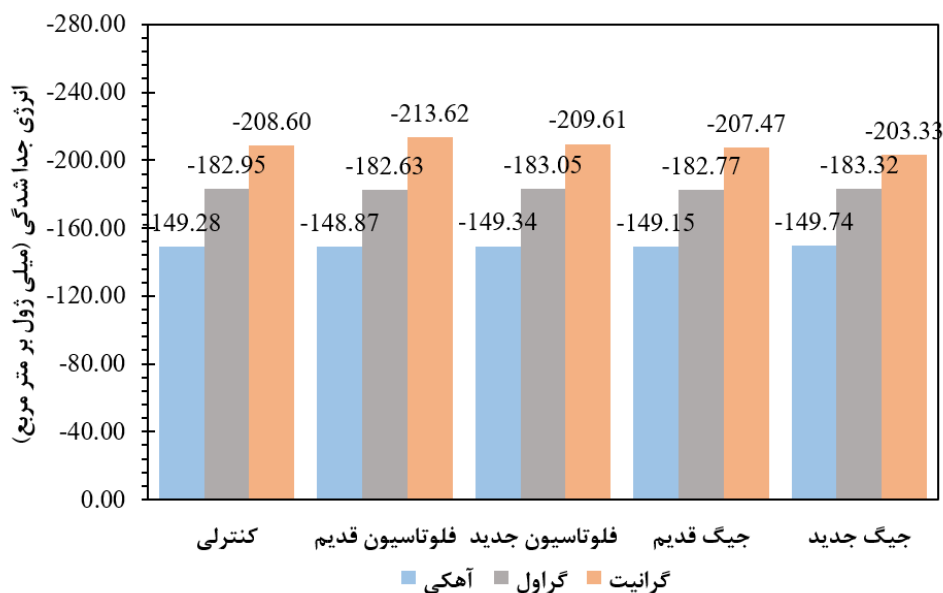
شکل ۷. ترکیبات سنگدانه‌های مختلف از نظر خاصیت باز-اسید [۶]

Fig. 7. Composites of various aggregates in terms of alkali-acid properties



شکل ۸. کار چسبندگی نمونه‌های قیری اصلاح شده همراه با سنگدانه‌های مختلف

Fig. 8. Work of adhesion of modified bitumen samples with different types of aggregates



شکل ۹. کار جدا شدگی نمونه‌های قیری اصلاح شده همراه با سنگدانه‌های مختلف

Fig. 9. Work of debonding of modified bitumen samples with different types of aggregates

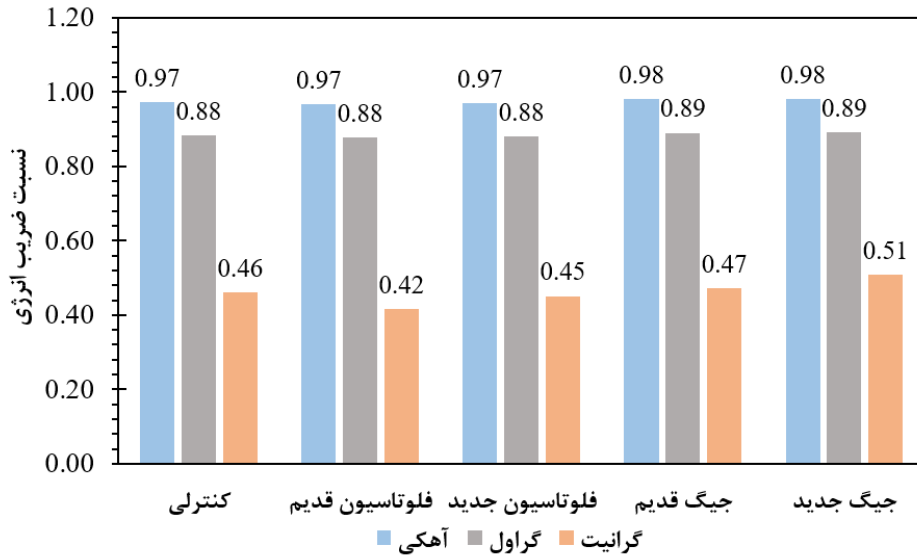
مقدار نسبت انرژی مخلوط قیری حاوی باطله فلوتاسیون و سنگدانه گرانیتی کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. با افزودن باطله جیگ (قدیم و جدید) مقدار نسبت انرژی برای تمام انواع سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد و این بدین معناست که باطله زغال سنگ جیگ موجب بهبود خرابی رطوبتی برای انواع سنگدانه می‌شود.

۴-۴- تنش کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

مقادیر تنش کششی غیرمستقیم حالت خشک و تر مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱۱ آورده شده است مطابق شکل می‌توان دید که مخلوط‌های اصلاحی با باطله‌های فلوتاسیون جدید و جیگ قدیم و جدید در حالت خشک عملکرد بهتری دارند. با عمل‌آوری نمونه‌ها مقدار مقاومت کششی نمونه‌های اصلاحی با باطله جیگ (قدیم و جدید) نسبت به نمونه شاهد کاهش مقدار کمتری را تجربه می‌کنند که نتیجه مشابه با نتیجه مطالعه مدرس و رحمان‌زاده در سال ۲۰۱۶ می‌باشد [۱۳] و علت آن مطابق نتایج آزمایش انرژی آزاد سطحی می‌تواند تشکیل پیوند قوی بین قیر اصلاحی و سنگدانه در برابر رطوبت باشد. مطابق نتایج آزمایش انرژی آزاد سطحی مشاهده شد که افزودن باطله جیگ (قدیم و جدید) به قیر مقدار انرژی آزاد سطحی کل را افزایش داده و در نتیجه مقدار کار جدا شدگی نمونه‌های حاوی باطله جیگ (قدیم و جدید) کمتر از بقیه نمونه‌ها به دست می‌آید.

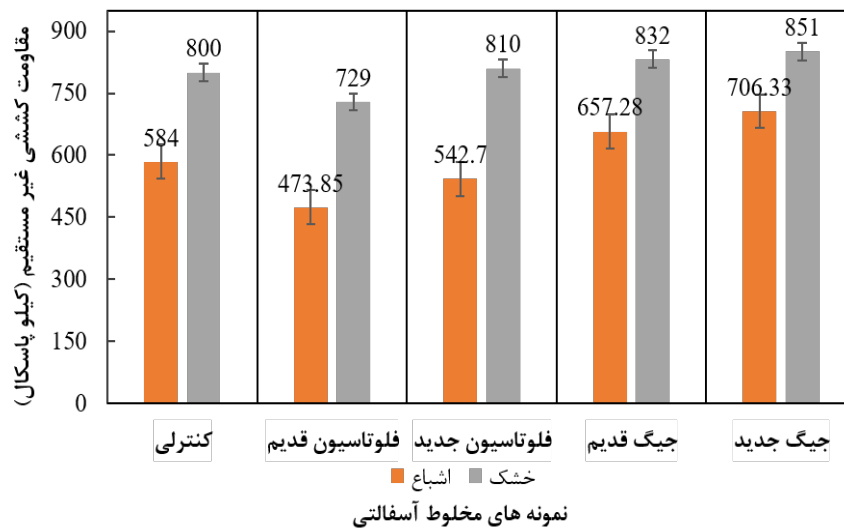
کار جدا شدگی در واقع همان کار چسبندگی قیر و سنگدانه در حضور آب است که به عنوان کار جدا شدگی تعریف می‌شود. مشابه روند کار چسبندگی، افزودن باطله فلوتاسیون (جدید و قدیم) موجب افزایش کار جدا شدگی در سنگدانه گرانیتی و آهکی شده ولی روند مشخصی بر روی سنگدانه گراول ندارد (شکل ۹). علت این امر ممکن است به این دلیل باشد که آب به خاطر داشتن انرژی سطحی بالا، تاثیر بیشتری بر روی چسبندگی قیر و سنگدانه دارد [۴۶]. مطابق نتایج مشاهده می‌شود که تاثیر آب بر روی چسبندگی مخلوط قیر حاوی باطله فلوتاسیون و سنگدانه نسبت به مخلوط قیر پایه بیشتر است و افزودن باطله فلوتاسیون موجب تشدید بیشتر حساسیت رطوبتی می‌شود. مطابق شکل ۹ افزودن باطله جیگ (جدید و قدیم) به قیر پایه نیز موجب کاهش چشمگیر کار جدا شدگی در سنگدانه‌های گرانیتی و آهکی می‌شود. به کمک پارامترهای کار جدا شدگی و کار چسبندگی، مقدار ضریب انرژی جهت بررسی بهتر پتانسیل مقاومت مخلوط قیر و سنگدانه در برابر خرابی رطوبتی اندازه‌گیری می‌شود.

نسبت انرژی تمام نمونه‌های مخلوط قیری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار نسبت انرژی یک شاخص برای درک تاثیر آب در چسبندگی مخلوط قیری و سنگدانه است و بین نسبت انرژی و حساسیت رطوبتی رابطه مستقیمی وجود دارد. بدین سان نسبت انرژی بالاتر پتانسیل خرابی رطوبتی کمتری دارد. مطابق روند کار چسبندگی و کار جدا شدگی انتظار می‌رفت که



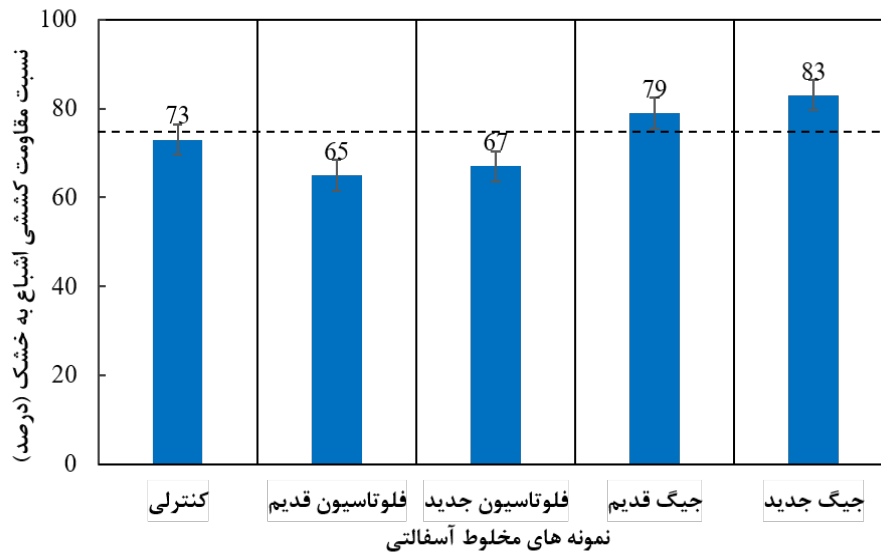
شکل ۱۰. نسبت انرژی مخلوط‌های قیری اصلاح شده همراه با سنگدانه‌های مختلف

Fig. 10. Energy ratio of modified bitumen samples with different types of aggregates



شکل ۱۱. مقدار تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی در حالت اشباع و خشک

Fig. 11. The indirect tensile strength value of asphalt mixtures on conditioned and unconditioned state



شکل ۱۲. مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی

Fig. 12. The TSR value of asphalt mixtures

نسبت انرژی نیز مطابق نتایج حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بوده و نشان می‌دهد که باطله زغال سنگ جیگ موجب بهبود خرابی رطوبتی برای انواع سنگدانه می‌شود و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با آن می‌تواند در مناطق مرطوب مورد استفاده قرار گیرد.

۵- تحلیل اقتصادی

مبحث هزینه احداث روسازی در کنار طرح توجیهی آن از مهم‌ترین پارامترها در انتخاب نوع روسازی به حساب می‌آید. علاوه بر هزینه بحث کاهش آسیب زیست محیطی و مصارف انرژی نیز امروزه مدنظر قرار می‌گیرد. در این مطالعه به منظور بررسی توجیه اقتصادی طرح اختلاط مدنظر، هزینه احداث یک کیلومتر روسازی آسفالتی بدون لحاظ کردن سایر پارامترهای تاثیرگذار از جمله هزینه حمل مصالح، اصلاح قیر، انرژی مصرفی و هزینه تعمیر و نگهداری در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار درصد بهینه افزودنی‌های مورد بررسی و قیر بهینه در یک تن آسفالت به ترتیب هر کدام خواهیم داشت: مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی معمولی و نیمه گرم برابر ۴/۸ فرض می‌شود که در یک تن مخلوط آسفالتی معمولی به مقدار ۵۰/۴۲ کیلوگرم قیر معمولی و در یک تن مخلوط آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با ۳ درصد ساسوبیت به مقدار ۵۰/۴۲ کیلوگرم قیر معمولی و ۱/۵۱ کیلوگرم ساسوبیت نیاز می‌باشد. در مخلوط آسفالتی اصلاح شده ۷ درصد

شکل ۱۲ مقدار حساسیت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر رطوبت (نسبت تنش کششی غیرمستقیم) نشان می‌دهد. در بین نمونه‌ها تنها نمونه آسفالتی حاوی جیگ مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم قابل قبولی داشته (۷۹ و ۸۳ درصد) و بیشتر از حداقل معیار آیین‌نامه می‌باشد. این نتیجه هم راستا با نتیجه آزمایش مدرس و همکاران در سال ۲۰۱۵ می‌باشد که از باطله جیگ استفاده شده بود [۱۹]. نمونه‌های حاوی باطله جیگ (قدیم و جدید) علیرغم ترکیبات شیمیایی مشابه با باطله فلوتاسیون، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهند و علت این امر می‌تواند به دلیل کاهش گروه‌های عاملی مرتبط با حساسیت رطوبتی یعنی گروه عاملی سولفوکسید و همچنین گروه‌های عاملی که با پیوند هیدروژنی همراه هستند، باشد. نمونه‌های باطله فلوتاسیون (قدیم و جدید) در مرحله عمل‌آوری بیشترین افت مقاومتی را داشته و در نتیجه تاثیر منفی بر حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی دارد. در مقایسه نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ قدیم (فلوتاسیون و جیگ) و جدید مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی باطله جدید (فلوتاسیون و جیگ) عملکرد بهتری دارند و مقاومت رطوبتی آن‌ها نسبت بهتری در مقایسه با نمونه‌های حاوی باطله قدیم دارند. علت این تفاوت می‌تواند به دلیل تاثیر عوامل جوی و رطوبتی بر روی نمونه‌های باطله‌ای باشد که مدت مدیدی از زمان استخراج و زغال‌شویی زغال سنگ آن‌ها گذشته و باطله آن‌ها تحت عوامل جوی قرار گرفته و اکسید شده‌اند. نتایج انرژی آزاد سطحی بخش

جدول ۹. هزینه احداث روسازی‌های متداول و اصلاح شده

Table 9. The cost of construction conventional and modified pavements

هزینه کل	هزینه قیر برای یک کیلومتر	هزینه باطله زغال سنگ برای یک کیلومتر	هزینه SBS برای یک کیلومتر	هزینه ساسوبیت برای یک کیلومتر	هزینه (میلیون تومان)	نوع مخلوط
۸۱۶/۴۸	۴/۵×۰/۰۵۰۴×۳۶۰۰*	-	-	-	-	معمولی
۱۱۴۲/۶۴	۴/۵×۰/۰۵۰۴×۳۶۰۰	-	-	۶۰×۰/۰۰۱۵۱×۳۶۰۰	-	نیمه گرم
۸۲۲/۹۲	۴/۵×۰/۰۵۰۴×۳۶۰۰	۰/۵×۰/۰۰۳۵۸×۳۶۰۰	-	-	-	باطله زغال سنگ
۱۲۷۰/۰۸	۴/۵×۰/۰۵۰۴×۳۶۰۰	-	۵۰×۰/۰۰۲۵۲×۳۶۰۰	-	-	SBS

* مقدار آسفالت مورد نیاز برحسب تن برای یک کیلومتر روسازی با ضخامت ۱۵ سانتی‌متری

رطوبت بالا عملکرد روسازی آسفالتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، می‌تواند راهکار مناسبی جهت افزایش عمر و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی باشد.

در ذیل مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش آورده شده است. طیف نمونه‌های باطله زغال سنگ جیگ و فلوتاسیون مشابه یکدیگر بوده ولی در برخی پیک‌های مشترک شدت جذب متفاوتی دارند، به طور مثال شدت جذب در طول موج مرتبط با گروه عاملی سولفوکسید (cm-1۰۳۰) در نمونه اصلاح شده با جیگ کمتر از فلوتاسیون می‌باشد.

جیگ قدیم و جیگ جدید موجب افزایش مولفه قطبی قیر شده (به ترتیب به اندازه ۴ و ۲۴ درصد) که این افزایش در خصوصیات قطبی قیر باعث می‌شود تا میل به چسبندگی آن به مواد قطبی مانند سنگدانه و آب افزایش یابد.

افزودن باطله فلوتاسیون (قدیم و جدید) انرژی چسبندگی را در مخلوط‌های قیری کاهش می‌دهد (در سنگدانه‌های گراول و آهکی تاثیر جزئی داشته و در سنگدانه گرانیت به ترتیب باعث کاهش ۷ و ۲ درصدی می‌شود) و قیرهای اصلاح شده با باطله جیگ (قدیم و جدید) تاثیر مثبتی بر روی انرژی چسبندگی داشته و همواره موجب افزایش این پارامتر می‌شود (در سنگدانه‌های گراول و آهکی تاثیر جزئی داشته و در سنگدانه گرانیت به ترتیب باعث افزایش ۲ و ۸ درصدی می‌شود).

افزودن باطله جیگ (جدید و قدیم) و باطله فلوتاسیون (جدید و قدیم) به قیر پایه به ترتیب موجب کاهش چشمگیر و افزایش کار جدا شدگی در سنگدانه‌های گرانیتی و آهکی می‌شوند.

باطله زغال سنگ به مقدار ۵۰/۴۲ کیلوگرم قیر معمولی و ۳/۵۸ باطله زغال سنگ نیاز خواهد بود. همچنین در مخلوط اصلاح شده با ۵ درصد SBS به مقدار ۵۰/۴۲ کیلوگرم قیر و ۲/۵۲ کیلوگرم SBS نیاز می‌باشد. مطابق قیمت روز مواد و افزودنی‌ها برحسب تن خواهیم داشت: قیمت هر تن قیر ۴/۵ میلیون تومان، قیمت هر تن ساسوبیت ۶۰ میلیون تومان، قیمت هر تن SBS برابر ۵۰ میلیون تومان و قیمت هر تن باطله زغال سنگ برابر ۰/۵ میلیون تومان بوده که هزینه احداث روسازی‌های اصلاح شده با هر افزودنی مطابق جدول ۹ خواهد بود.

مطابق جدول مشاهده می‌شود که هزینه احداث روسازی اصلاح شده با SBS و همچنین روسازی نیمه‌گرم رقم قابل توجهی نسبت به روسازی متداول دارند در حالی که هزینه احداث روسازی اصلاح شده با باطله زغال سنگ تفاوت خیلی ناچیزی و تقریباً برابری با روسازی متداول دارد. با در نظر گرفتن مزایای روسازی‌های اصلاح شده در بحث مقاومت رطوبتی و سایر خرابی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که روسازی ساخته شده با باطله زغال سنگ مقرون به صرفه بوده که کاهش آسیب زیست محیطی نیز به همراه دارد.

۶- نتیجه‌گیری

استفاده روز افزون از زغال سنگ و تولید باطله‌های زغال سنگ در کارخانجات تهدید بزرگی برای محیط زیست بوده و همواره مهندسان را بر این امر واداشته که جهت کاهش تاثیرات منفی آن بر محیط زیست، از این باطله‌ها در تولید بتن و مخلوط‌های آسفالتی استفاده شود. استفاده از این افزودنی در ساخت آسفالت در مناطق شمالی کشور که همیشه مشکل

- [8] M. Fakhri, A. Ahmadi, Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation, *Construction and Building Materials*, 147 (2017) 630-638.
- [9] M.F. Tafti, M.M. Khabiri, H.K. Sanij, Experimental investigation of the effect of using different aggregate types on WMA mixtures, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(5) (2016) 376-386.
- [10] S. Masoudi, m. Abtahi, a. Goli, Investigation of Long-term Performance of Warm Mix Asphalts Containing EAF Steel Slag (in Persian), *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 2(4) (2017) 23-42.
- [11] S. Hesami, M. Ameri, H. Goli, A. Akbari, Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates, *International Journal of Pavement Engineering*, 16(8) (2015) 745-759.
- [12] M. Shahhoseiny, F. Doulati Ardejani, S.Z. Shafaei, M. Noaparast, D. Hamidi, Geochemical and mineralogical characterization of a pyritic waste pile at the Anjir Tangeh coal washing plant, Zirab, Northern Iran, *Mine Water and the Environment*, 32(2) (2013) 84-96.
- [13] A. Modares, M. Rahmanzadeh, Comparing the Effects of Coal Waste Filler and Pozzolanic Fillers on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt (in Persian), *Journal of Transportation Research*, 13(3) (2016) 86-103.
- [14] J. Kinuthia, R. Nidzam, Effect of slag and siliceous additions on the performance of stabilized coal waste backfill, in: *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, KY, USA, 2009.
- [15] M. Frías, M.S. De Rojas, R. García, A.J. Valdés, C. Medina, Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement, *Cement and Concrete Composites*, 34(5) (2012) 678-683.
- [16] S. Chhaiba, M.T. Blanco-Varela, A. Diouri, S. Bougarrani, Characterization and hydration of cements and pastes obtained from raw mix containing Moroccan oil shale and coal waste as a raw material, *Construction and Building Materials*, 189 (2018) 539-549.
- باطله جیگ (قدیم و جدید) مقدار نسبت انرژی را افزایش داده و این بدین معناست که باطله زغال سنگ جیگ موجب بهبود خرابی رطوبتی برای انواع سنگدانه می‌شود.
- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی باطله جیگ (قدیم و جدید) علیرغم ترکیبات شیمیایی مشابه با باطله فلوتاسیون، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را به ترتیب به اندازه ۸ و ۱۴ درصد کاهش می‌دهند که این نتیجه هم راستا با نتیجه آزمایش انرژی آزاد سطحی می‌باشد.

منابع

- [1] M.R. Kakar, M.O. Hamzah, J. Valentin, A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations, *Journal of Cleaner Production*, 99 (2015) 39-58.
- [2] A.M. Esarwi, M.R. Hainin, A.A. Chik, Stripping resistance of malaysian hot mix asphalt mixture using hydrated lime as filler, in: *EASTS International Symposium on Sustainable Transportation incorporating Malaysian Universities Transport Research Forum Conference*, Malaysia, 2008.
- [3] K.D. Stuart, *Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report*, (1990).
- [4] S. Amelian, M. Manian, S.M. Abtahi, A. Goli, Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag, *Journal of Cleaner Production*, 176 (2018) 329-337.
- [5] F. Maghool, A. Arulrajah, Y.-J. Du, S. Horpibulsuk, A. Chinkulkijniwat, Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(4) (2017) 949-958.
- [6] S. Sobhi, A. Yusefi, S. Hesami, M. Ameri, An investigation of factors affecting the moisture sensitivity of warm mix asphalt (WMA), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(1) (2020) 187-212.
- [7] A. Kavussi, M.J. Qazizadeh, Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging, *Construction and Building Materials*, 72 (2014) 158-166.

- of surface free energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents, *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 456-464.
- [27] D. Cheng, D.N. Little, R.L. Lytton, J.C. Holste, Use of surface free energy properties of the asphalt-aggregate system to predict moisture damage potential (with discussion), *Journal of the association of asphalt paving technologists*, 71 (2002).
- [28] Z. Jian-Min, M. Fei, X. Ke-Wei, Calculation of the surface energy of FCC metals with modified embedded-atom method, *Chinese Physics*, 13(7) (2004) 1082.
- [29] M. Shaker, E. Salahinejad, A combined criterion of surface free energy and roughness to predict the wettability of non-ideal low-energy surfaces, *Progress in Organic Coatings*, 119 (2018) 123-126.
- [30] D. Cheng, D.N. Little, R.L. Lytton, J.C. Holste, Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, 1810(1) (2002) 44-53.
- [31] A. Bhasin, Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water, Texas A&M University, 2007.
- [32] J.E. Howson, Relationship between surface free energy and total work of fracture of asphalt binder and asphalt binder-aggregate interfaces, 2011.
- [33] E. Ensley, J. Petersen, R. Robertson, Asphalt—aggregate bonding energy measurements by microcalorimetric methods, *Thermochimica Acta*, 77(1-3) (1984) 95-107.
- [34] G.H. Hamed, A. Ali Pour, Evaluation of moisture sensitivity of asphalt mixtures modified with nanoparticle (zinc and silicon oxides) (in Persian), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5) (2020) 1243-1264.
- [35] D. Saedi, H. shirmohammadi, G.H. Hamed, Y. Azaryun, Comparison of the effect of using mineral nanomaterials on the performance of HMA and glasphalt agaiants the moisture damage (in Persian), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12) (2021) 2965-2986.
- [36] C.J. Van Oss, M.K. Chaudhury, R.J. Good, Interfacial
- [17] X. Feng, W. Chen, W. Li, Effects of silane coupling agent modified coal waste powder on performance of asphalt mortar and asphalt mixture, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(4) (2020) 383-391.
- [18] A. Modarres, P. Ayar, Coal waste application in recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion, *Journal of Cleaner Production*, 83 (2014) 263-272.
- [19] A. Modarres, M. Rahmanzadeh, P. Ayar, Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts, *Journal of Cleaner Production*, 91 (2015) 262-268.
- [20] A. Ameli, R. Babagoli, N. Norouzi, F. Jalali, F.P. Mamaghani, Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117557.
- [21] G. Shafabakhsh, A. Rahmani, M. Sadeghnejad, Evaluation the Effect of Different Kind of Waste and Mineral Filler on the Fatigue Life of Asphalt Mixtures with Dissipated Energy Method, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 10(2) (2022) 56-67.
- [22] P. Xu, Z. Chen, J. Cai, J. Pei, J. Gao, J. Zhang, J. Zhang, The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures, *Construction and Building Materials*, 203 (2019) 9-17.
- [23] M. Abbastabardelavar, A. Izadi, F. Asadiamiri, Investigating effects of coal flotation waste on aged hot mix asphalt performance, *Civil Engineering Journal*, 4(10) (2018) 2491-2501.
- [24] S. Sobhi, S. Hesami, M. Poursoltani, P. Ayar, R.S. Mullapudi, Coupled Effects of Gilsonite and Sasobit on Binder Properties: Rheological and Chemical Analysis, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3) (2022) 04021470.
- [25] R.G. Hicks, Moisture damage in asphalt concrete, *Transportation Research Board*, 1991.
- [26] G. Shafabakhsh, M. Faramarzi, M. Sadeghnejad, Use

- Annual Meeting, Washington, DC, USA, 2017, pp. 8-12.
- [42] H.F. Haghshenas, Y.-R. Kim, M.D. Morton, T. Smith, M. Khedmati, D.F. Haghshenas, Effect of softening additives on the moisture susceptibility of recycled bituminous materials using chemical-mechanical-imaging methods, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9) (2018) 04018207.
- [43] D. Cheng, Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy, Texas A&M University, 2002.
- [44] M.I. Souliman, E.Y. Hajj, P.E. Sebaaly, Impact of antistripping additives on the long-term aging rheological properties of asphalt binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(8) (2015) C4014006.
- [45] S. Liu, X. Yu, F. Dong, Evaluation of moisture susceptibility of foamed warm asphalt produced by water injection using surface free energy method, *Construction and Building Materials*, 131 (2017) 138-145.
- [46] S. Sobhi, A. Yousefi, A. Behnood, The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 238 (2020) 117676.
- Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems, *Chemical reviews*, 88(6) (1988) 927-941.
- [37] A.W. Hefer, A. Bhasin, D.N. Little, Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6) (2006) 759-767.
- [38] S. Hesami, H. Roshani, G.H. Hamed, A. Azarhoosh, Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 935-941.
- [39] R. Ghabchi, D. Singh, M. Zaman, Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method, *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 479-489.
- [40] A. Bhasin, D.N. Little, K.L. Vasconcelos, E. Masad, Surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes, *Transportation Research Record*, 2001(1) (2007) 37-45.
- [41] A.A. Nasrekani, M. Nakhaei, K. Naderi, E. Fini, S. Aflaki, Improving moisture sensitivity of asphalt concrete using natural bitumen (Gilsonite), in: *Proceedings of the Transportation Research Board (TRB 2017)*, the 96th

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Qolizade, H. Divandari, S. Sobhi, *Investigation of using Coal Waste in asphalt mixtures and its effects on moisture damage with the approach of bitumen chemistry and asphalt mixture mechanical test, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4769-4788.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.21476.7735

