

# بررسی آزمایشگاهی بازیافت سرد آسفالت با امولسیون قیر رسی

مصطفی کلانتری سرچشمه، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

حامد خانی سانجی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [mkhabiri@yazd.ac.ir](mailto:mkhabiri@yazd.ac.ir)

تاریخ دریافت: 95/09/07 - تاریخ پذیرش: 95/12/15

## چکیده

تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که افزودن مقداری رس به قیر، عملکرد آسفالت را در مقابل ترک خوردگی، جاری شدن و مقاومت در برابر ضربه بهبود می‌بخشد. برای بهره‌گیری از این خواص در آسفالت سرد بازیافتی می‌توان از امولسیون‌های قیری رسی استفاده کرد. در این پژوهش بر اساس سوابق تحقیقات انجام گرفته بر روی امولسیون‌های رسی و مخلوط‌های سرد بازیافتی با قیر امولسیون نمونه‌هایی از امولسیون رسی با استفاده از دو نوع بنتونیت متفاوت، به روش آزمایشگاهی هموزنایزر تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. تا از صحت محصول تولید شده اطمینان حاصل شود. پس از تولید موفق امولسیون رسی و کنترل‌های کیفیت مربوط نمونه‌هایی از مخلوط آسفالت بازیافتی با این نوع امولسیون تهیه و مورد آزمایش و مقایسه با مخلوط بازیافتی با یک نوع امولسیون کاتیونیک رایج قرار می‌گیرند تا تأثیرات امولسیون رسی مورد بررسی قرار گیرند. در این پژوهش مخلوط‌های آسفالت بازیافتی تهیه شده بر اساس آزمایش‌های عملکردی مشتمل بر آزمون مقاومت مارشال، آزمون کشش غیرمستقیم در شرایط خشک و اشباع و همچنین آزمون مدول برجهندگی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند که اگرچه بازیافت سرد آسفالت با استفاده از امولسیون‌های رسی منجر به ارتقاء ویژگی‌های مقاومتی آن می‌شود، ولی در شرایط رطوبتی عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: امولسیون قیری رسی، بنتونیت، بازیافت سرد، خواص عملکردی، مخلوط آسفالتی

## ۱- مقدمه

شهرسازی، (1385). تعمیر و نگهداری روسازی‌های به صورت مختلف نظیر تعمیر و نگهداری اساسی، اصلاحی و پیشگیرانه می‌تواند انجام گیرد، که بازیافت سرد از روش‌های نگهداری اساسی و بهسازی روسازی محسوب می‌شود (khabiri, 2009). خصوصیات مخلوط‌های آسفالت بازیافت شده، تحت تأثیر خصوصیات و میزان مصرف آسفالت قدیمی در مخلوط‌های بازیافتی می‌باشد. در این خصوص دانشمندان در پژوهش‌های

بازیافت آسفالت، استفاده مجدد از آسفالت‌های قدیمی است که قابلیت خدمت‌دهی اولیه خود را از دست داده است. این عمل معمولاً پس از اجرای اندکی فعل و انفعالات بر روی آسفالت قدیمی و احتمالاً افزودن مصالح و مواد جدید به آن صورت می‌گیرد. حفظ منابع طبیعی، کاهش هزینه ساخت، ازدیاد استقامت روسازی موجود قبل از روکش و اصلاح خرابی‌های سطحی، پاره‌ای از مزایای این تکنولوژی محسوب می‌شود (وزارت راه و

متعددی نشان داده‌اند که خصوصیات ساختمانی مخلوط‌های بازیافتی، در بعضی موارد حتی از مخلوط آسفالتی جدید بهتر است.

بازیافت مخلوط‌های آسفالت از اواخر سال‌های 1970 رواج زیادی پیدا کرد (Ali, 2017). دلایل متفاوتی باعث افزایش تقاضا از بازیافت شده است. شاید مهم‌ترین علت، تحریم نفت توسط اعراب در اوایل دهه 1970 و افزایش متعاقب قیمت قیر باشد (Ndinyo, Gariy and Mulei, 2017). افزایش قیمت قیر، مصالح بازیافتی روسازی آسفالتی خردشده (RAP)<sup>1</sup> را بسیار باارزش ساخت. قبل از تحریم نفت، قیمت قیر بسیار پایین بود به طوری که هزینه برداشت، دپو کردن و بازیافت روسازی‌های قدیمی بیشتر از خرید، اختلاط و پخش مصالح جدید بود.

در اوایل دهه 1970 میلادی بهسازی راه‌ها شامل تجدید ساخت روسازی با استفاده از وسایل و تجهیزات متعارف برای نوسازی بود. در دو دهه اخیر توجه بیشتر به محیط‌زیست، کاهش معادن مصالح سنگ مرغوب، افزایش حجم ترافیک، دشواری شیوه‌های قدیمی ترمیم و بهسازی و در مواردی غیر مؤثر بودن آن‌ها، متولیان راهداری و راه‌سازی را به استفاده از پتانسیل مصالح موجود و روش‌های بهسازی مؤثر، مجاب نموده است (بذرافشان، 1388). از میان روش‌های مختلف بازیافت روسازی، بازیافت سرد (CR)<sup>2</sup> با استفاده از قیر امولسیون‌گزینه‌ای است که علاوه بر مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، می‌تواند بدون آسیب رساندن به بستر و مقاومت آن، فرآیند اصلاح و استفاده مجدد را امکان‌پذیر سازد. مفهوم بازیافت سرد آسفالت (CR) عبارت است از استفاده از مصالح خرده آسفالت (RAP) پس از اصلاح دانه‌بندی با حداکثر 25 درصد [سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، 1385] سنگ‌دانه جدید (VA)<sup>3</sup> در لایه‌های آسفالتی تازه. این لایه که به‌عنوان زیراساس در سازه روسازی استفاده می‌شود، حدود 75 تا 90 درصد از مصالح RAP تشکیل شده است. به‌منظور محافظت در برابر بارهای ترافیک و جلوگیری از نفوذ آب، این لایه با مخلوط آسفالتی گرم (HMA)<sup>4</sup> پوشانده می‌شود. مصالح خرده آسفالتی شامل مصالح سنگی پوشیده شده با یک لایه نازک قیر پیر شده می‌باشند که از تراشیدن و آسیاب قسمت‌های آسیب‌دیده‌ی روسازی آسفالتی به دست می‌آیند.

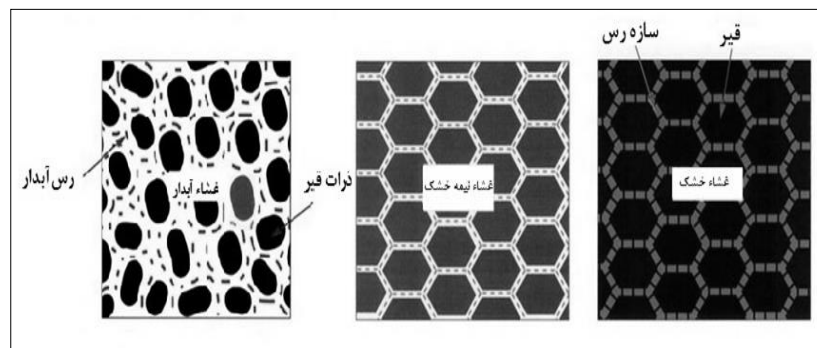
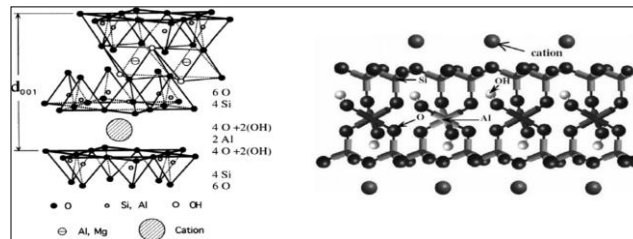
بخش اصلی بازیافت سرد شامل خرد کردن و اختلاط لایه آسفالتی رویه با مصالح لایه‌های زیرین (اساس) است. مهم‌ترین افزودنی موردنیاز در فرآیند بازیافت سرد آسفالت، قیر امولسیون است که همزمان با کندن و خرد کردن لایه آسفالتی و مصالح زیرین آن به مصالح خردشده اضافه می‌شود. مصالح تولیدشده مخلوط یکنواختی است که در یک مرحله تولید و بلافاصله بر روی زمین پخش و متراکم می‌شود و در مدت‌زمانی کوتاه، عبور ترافیک بر روی آن امکان‌پذیر خواهد شد. پس از چند روز می‌توان با اجرای لایه روکش آسفالتی، سطح راه را به‌صورت نهایی مورد بهره‌برداری قرارداد. مجموعه این عملیات منجر به افزایش باربری در مدت‌زمانی بسیار کوتاه و آماده شدن آن برای بهره‌برداری مجدد می‌شود. استفاده از بازیافت سرد در جهان تقریباً از اوایل 1980 میلادی شروع شده است (Rogge et al., 1992). از آن زمان تاکنون اصلاح قیر امولسیون به‌عنوان راهی برای بهبود عملکرد مخلوط‌های بازیافتی سرد در برابر خرابی‌های مرسوم به کار می‌رود. تجربیات گذشته نشان داده‌اند که روسازی‌های بازیافتی با انتخاب درست نوع افزودنی، عملکرد بهتری خواهند داشت. عموماً امولسیون‌هایی که حاوی 40 تا 80 درصد قیر هستند، در هنگام استفاده به‌صورت سیال به رنگ قهوه‌ای تیره که گرانشی آن‌ها حدود روانی شیر یا خامه متغیر است و دارای قطر ذرات معلق متغیر از 0/1 تا 20 میکرومتر هستند. زمانی که قیر شروع به چسبیدن به سنگ‌دانه می‌کند رنگ از قهوه‌ای به سیاه تغییر کرده به عبارتی امولسیون شکسته<sup>5</sup> شده است. هنگامی که آب شروع به تبخیر می‌کند، امولسیون شروع به رفتاری بسیار شبیه به قیر خالص می‌کند. زمانی که تمامی آب آن تبخیر شد، امولسیون اصطلاحاً نشست<sup>6</sup> پیدا می‌کند. زمان لازم برای شکست و نشست، بستگی به نوع امولسیون، میزان استفاده، دمای سطحی که امولسیون در روی آن اجرا شده است و شرایط محیطی دارد (Yeung, 2017). امولسیون‌های رسی گروهی از امولسیون‌های قیری هستند که با استفاده از امولسیون سازه‌های معدنی تهیه می‌شوند که در این زمینه باید به مواد جامد بسیار ریز مانند کربن بلاک، پودر سیلیکون و همچنین برخی از خاک‌های گروه رسی از قبیل کائولین، میکای آبدار و بنتونیت که به درجات مختلف دارای خاصیت بادکنندگی در فاز آبی (هیدراته شدن) می‌باشند اشاره کرد. این خاصیت در مورد بنتونیت که نوعی خاک

آمدن نیروی دافعه الکتریکی بین ذرات شده و مانع نزدیک شدن آن‌ها به یکدیگر می‌شود. امولسیون‌سازها از نقطه نظر ساختاری بر دو نوع هستند. امولسیون‌سازهای شیمیایی (شکل 3 الف) که خود به دو گروه کاتیونی و آنیونی تقسیم می‌شوند و امولسیون‌سازهای معدنی که عمدتاً از نوع رسی (شکل 3 ب) هستند.

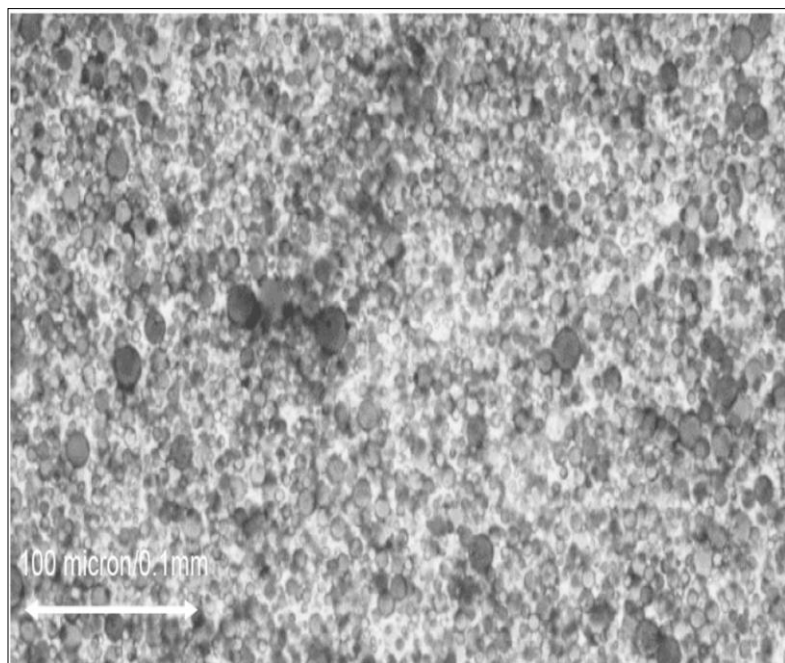
امولسیون‌هایی که عمدتاً در بازیافت سرد آسفالت به کار می‌روند بیشتر از نوع امولسیون با ماندگاری و شناوری بالا<sup>7</sup> است (Lee et al. 2016). در حال حاضر با توجه به مشخصات مصالح سنگی و کاربردهای مورد نظر، امولسیون‌های تولیدی در کشور بیشتر از نوع کاتیونی است، لیکن علیرغم توسعه مراکز تولید امولسیون داخلی، استفاده از امولسیون مانند کشورهای پیشرفته گسترش پیدا نکرده است. از این رو یافتن راهی که مسائل اقتصادی را برطرف کرده، از پیچیدگی‌های تولید بکاهد و بهبود کیفیت امولسیون را سبب شود، می‌تواند جایگاه امولسیون‌های قیری را در پروژه‌های راه‌سازی و بهسازی ارتقا بخشد. یکی از راه‌کارهای مؤثر در این زمینه استفاده از قیرهای امولسیون اصلاح‌شده به منظور تطابق بیشتر با شرایط محیطی و نوع کاربرد است.

رس از گروه مونت‌موریلونیت‌ها (شکل 1) است به دلیل ساختمان کریستالی ویژه دارای نمود بیشتری است. به همین دلیل بتونیت خاصیت امولسیون‌کنندگی بیشتری نسبت به مواد مشابه دارد و حتی انواع خاصی از آن قبل از پیدایش صابون‌ها به‌عنوان پاک‌کننده مصرف می‌گردید. بتونیت نوعی رس ریزدانه است که حداقل ۸۵ درصد رس مونت‌موریلونیت دارد. اکثر بتونیت‌ها بر اثر هوازدگی و دگرسانی خاکسترهای آتشفشانی و اغلب در حضور آب تشکیل می‌شوند و سنگ منشأ آن‌ها اکثراً بازیک است. تجزیه خاکستر آتشفشانی عمدتاً در محیط شور و باتلاقی انجام می‌شود و هر چه از آتشفشان فاصله زیاد شود، ضخامت بتونیت کاهش می‌یابد. بتونیت دارای ساختمان آلومینوسیلیکاتی است و در دسته سیلیکات‌های سه لایه قرار می‌گیرد. شکل 2، غشای امولسیون رسی در حالت کلیدی، شکست امولسیون و پس از آن را نمایش می‌دهد (Shell Bitumen, 1995).

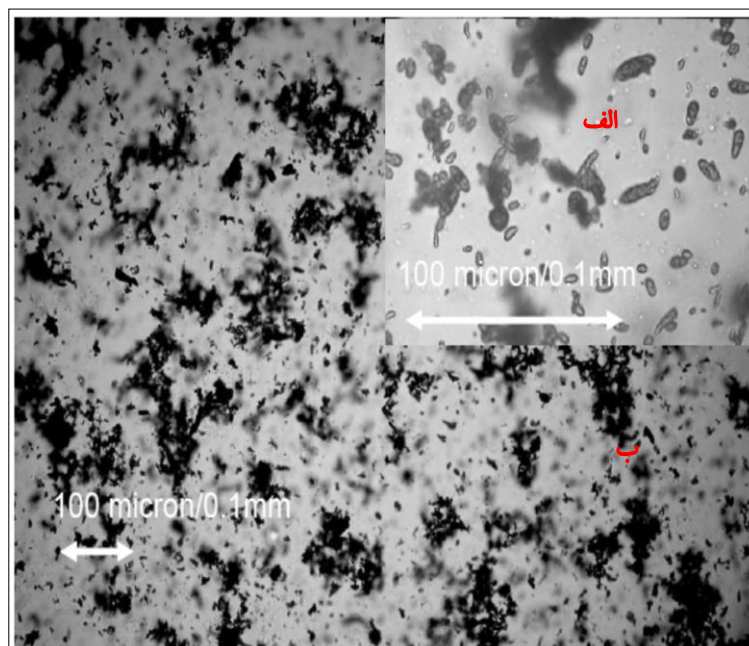
اولین بار در سال 1925 هیو آلن مکی امولسیون قیر را تولید و ثبت کرد (Alan, 1925). برای تهیه این فرآورده قیر گرم، آب و ماده امولسیون‌ساز را با نسبت‌های معین با اعمال انرژی مخلوط می‌کنند. نقش امولسیون‌ساز، جلوگیری از به هم پیوستن مجدد ذرات معلق است و با پوشش سطح ذرات معلق، باعث به وجود



شکل 1. ساختار مولکولی مونت‌موریلونیت [Kotal and Bhowmick, 2015]



شکل 2. غشای امولسیون رسی در حالت کلویدی، شکست امولسیون و پس از آن [Shell Bitumen, 1995]



شکل 3. فتومیکروگراف از امولسیون شیمیایی (الف) و امولسیون رسی (ب) [James, 2010][salomon, 2006]

بتونیت مقاومت الکتریکی پایینی دارد و در شرایط معمولی خشک نمی‌شود، دارای دو لایه چهاروجهی و یک لایه هشت‌وجهی می‌باشد.

بتونیت با فرمول شیمیایی  $(\text{NaCa})(\text{AlMg})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ، یک کانی رسی است (Dwarapudi et al., 2008) که اساساً از کانی‌های گروه اسمکتیت تشکیل شده است. از خواص مهم کانی‌های خانواده اسمکتیت، جان‌شینی یونی، خاصیت شکل‌پذیری، انبساط و انقباض یونی آن‌ها را می‌توان نام برد. بتونیت‌های متورم یا بتونیت‌های سدیم‌دار می‌توانند چندین برابر حجم معمولی خود آب جذب کند، به طوری که حالت ژله‌ای، پلاستیکی و چسبندگی به خود می‌گیرد (Ziari et al., 2012).

در امولسیون‌های رسی، فاز پیوسته یا خارجی شامل آب و رس است که به آن نوعی از مواد امولسیون‌ساز و اسید اضافه می‌شود و پس از افزودن فاز داخلی یا قیر، امولسیون رسی تشکیل می‌شود (Shell Bitumen, 1995). ذرات رس در امولسیون‌های رسی دو نقش عمده را ایفا می‌کنند، اولاً در مرحله تولید و ذخیره امولسیون به عنوان یک پایدارساز مانع به هم پیوستن قطرات قیر و انعقاد آن می‌شود؛ ثانیاً پس از شکست امولسیون و خشک شدن لایه قیر، درون آن اسکلتی را تشکیل می‌دهد که باعث مقاومت بیشتر آن و کاهش حساسیت به افزایش دما می‌شود (شکل 2). قیر باقیمانده پس از شکست امولسیون، خواص بهبودیافته روش افزودن رس به قیر خالص را دارد؛ به این ترتیب هم می‌توان از مزایای امولسیون بهره برد و هم کیفیت قیر را ارتقا بخشید.

## ۲- پیشینه تحقیقات

پژوهش‌های چندانی در ارتباط با کاربرد رس در اصلاح قیرها وجود ندارد، اما کاربرد آن در اصلاح پلیمرها بسیار زیاد است. قیر نیز نوعی پلیمر با ترکیب شیمیایی بسیار پیچیده است که انتظار می‌رود رس بر رفتار آن اثرگذار باشد. نانو کامپوزیت‌ها مهم‌ترین مصالح از نظر ساختمانی در مقیاس نانو هستند که اجزای اصلی آن‌ها طولی در مقیاس نانو دارند. به عبارتی نانو کامپوزیت دلالت بر هر نوع ماده‌ای با محتوایی در اندازه نانومتر در حداقل یک بعد دارد. نانو کامپوزیت‌های پلیمری یکی از بیشترین مواد مورد توجه در سال‌های اخیرند، به طوری که می‌توان مشخصات فیزیکی

پلیمرها را با مقدار بسیار اندکی مواد نانو چون نانو رس و پخش ذرات رس در سطح نانو بهبود داد. متغیرهای زیادی بر مشخصات نانو کامپوزیت‌ها اثرگذارند که بسیاری از آن‌ها قابل کنترل هستند. این متغیرها به طور کلی شامل نوع ذرات رس، روش آماده‌سازی ذرات رس، انتخاب ترکیبات پلیمر و روش ترکیب کردن پلیمر در نانو کامپوزیت هستند (Pinnavaia and Beall, 2000). گیل آزمایش‌های مکانیکی روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو رس cloisite انجام داد. نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده بهبود در خواص مکانیکی از جمله مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش و خستگی است [Ghile, 2006].

غفارپور و همکارانش با بهره‌گیری از دو نوع نانو رس متفاوت و متداول در بهبود خصوصیات مصالح قیر تلاش نمودند. آن‌ها با انجام آزمون‌های تجربی، تأثیر نانو رس بر رئولوژی قیر را مورد ارزیابی قرار دادند. به این منظور با به‌کارگیری یک برنامه آزمایشگاهی مدون، ابتدا پراکنش و پخش صفحات نانو رس در درصد وزنی متفاوت و با انتخاب یک روش ترمودینامیکی خاص، به کمک تکنیک پراش اشعه ایکس مورد کنکاش قرار دادند. سپس با به‌کارگیری رئومتر برش دینامیکی، عملکرد نانو رس‌های مختلف بر رفتار قیر را مقایسه و ارزیابی نمودند. تحلیل نتایج آزمون رئومتر برشی در دماهای مختلف به وضوح نشان داد که نانو رس، با تغییرات اساسی در شبکه مولکول‌های قیر همانند یک مسلح کننده عمل کرده و رفتار قیر را با تغییر ویسکوزیته تحت تأثیر قرار می‌دهد. شدت و میزان این تغییرات تابع نوع و میزان نانو رس است. همچنین با کاهش حساسیت حرارتی، مقاومت در برابر پیرشدگی نیز افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند. هرچند افزودن نانو رس باعث افزایش مدول مختلط برشی و کاهش زاویه اختلاف فاز می‌شود و می‌تواند مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار را افزایش دهد، اما به دلیل کاهش انعطاف‌پذیری، عملکرد مناسبی در بهبود رفتار خستگی ندارد (غفارپور و همکاران، 1389). وی همچنین نشان داد که نانو رس می‌تواند پایداری و مقاومت کششی غیرمستقیم را افزایش دهد (Ghfarpoor Andalibzade and Vossough, 2010).

خدادادی و همکارانش با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم عمر خستگی مخلوط آسفالتی گرم حاوی 2 درصد نانو رس را

مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم عمر خستگی که در سطوح تنش مختلف انجام شده، افزایش بیش از دو برابر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم را نشان دادند (خدادادی و همکاران، 1391).

او همچنین در تحقیق دیگری با آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه استوانه‌ای تحت تنش 200، 300، 400 و 500 کیلو پاسکال، افزایش عمر خستگی را برای نمونه‌های حاوی یک درصد نانو رس ثابت کرد (Khodadadi and Kokabi, 2007). یو و همکاران از مونت‌موریونیت و مونت‌موریونیت آلی اصلاح شده برای اصلاح قیر استفاده کردند. آن‌ها خصوصیات فیزیکی، رفتار رئولوژیک دینامیکی و پایداری در دمای بالای قیر اصلاح شده را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که اضافه کردن مونت‌موریونیت و مونت‌موریونیت آلی اصلاح شده باعث افزایش مقاومت شیارشدگی و پایداری می‌گردد. آن‌ها همچنین اثر مونت‌موریونیت را بر روی دمای اکسیداسیون و مشخصات پیرشدگی قیر بررسی کردند (Yu et al., 2007).

زارع و همکارانش در سال 2010 در تحقیق دیگری، قیر 60-70 با درصد‌های مختلف بنتونیت (0٪، 1٪، 2٪، 4٪، 6٪) مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. با بررسی نقطه نرمی مشخص شد که قیر اصلاح شده با بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح شده با نام‌های BT و OBT، نقطه نرمی بیشتری دارد. همچنین با انجام آزمایش ویسکوزیته مشخص شد ویسکوزیته قیر حاصل افزایش یافته است. با انجام آزمایش شکل‌پذیری مشخص شد

شکل‌پذیری قیر با افزایش بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح شده کاهش یافته است. علت این تغییر افزایش فاز جامد شکننده رس به فاز ویسکو الاستیک شکل‌پذیر قیر است. همچنین بررسی تغییرات مدول کمپلکس ( $G^*$ ) در برابر دما برای قیر اصلاح شده با بنتونیت BT و بنتونیت OBT نشان داد که مدول کمپلکس که شامل مدول الاستیسیته و مدول ویسکوز است، با افزایش دما کاهش یافته است. تغییرات زاویه فاز ( $\gamma$ ) نسبت به دما برای قیر اصلاح شده با BT و OBT نیز مورد آزمایش قرار گرفت. زاویه فاز به صورت اختلاف فاز بین تنش و کرنش در آزمایش نوسانی تعریف می‌شود. مقادیر ( $\gamma$ ) بیشتر نشان‌دهنده رفتار ویسکوزیته بیشتر و ( $\gamma$ ) کمتر نشان‌دهنده خاصیت الاستیک بیشتر است. نتایج

حاکی از آن بود که افزایش مواد افزودنی باعث افزایش زاویه فاز ( $\gamma$ ) شده است. از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)<sup>8</sup> در دمای (-12) درجه سانتی‌گراد، سختی خمشی برای قیر معمولی و اصلاح شده بعد از پیرشدگی توسط آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO)<sup>9</sup> و آزمایش محفظه تسریع پیرشدگی (PAV)<sup>10</sup> محاسبه شد و نتایج نشان داد که افزودن بنتونیت و بنتونیت آلی اصلاح شده باعث کاهش سختی نسبت به نمونه بدون افزودنی نشان‌دهنده این است که صفحات رسی در شبکه قیر از اکسیداسیون مولکول‌ها و تبخیر روغن‌های سبک جلوگیری می‌کند (Zare et al., 2010).

سورشکومار و همکاران در سال 2010 در خصوص تأثیر افزودنی رس در مخلوط‌های آسفالتی پلیمری، دریافتند که رس یک تأثیر سازگار با آسفالت و پلیمر دارد و سازگاری زیادی بین رس و پلیمر می‌تواند منجر به پراکندگی بهتر پلیمر در آسفالت شود، بنابراین بر خصوصیات نهایی رئولوژیکی سیستم‌های تحت مطالعه تأثیر می‌گذارد (Sureshkumar, 2010). در تحقیقی که در سال 2010 توسط گووهو همکاران انجام گردید، نتایج نشان داد که افزودن نانو رس و میکرو فیبرهای کربنی، اثرات مثبتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی دارد (Goh et al., 2011).

در تحقیقی دیگر تأثیر مقادیر مختلف ماده معدنی بنتونیت بر خواص قیر حاوی 16 درصد پودر لاستیک مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از بنتونیت با درصد‌های 1/5، 3، 4/5 و 6 نسبت به وزن قیر استفاده شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت افزودن بنتونیت به قیر حاوی لاستیک باعث کاهش درجه نفوذ قیر گردید و نقطه نرمی قیر حاوی لاستیک را افزایش داد. هرچه میزان درجه نفوذ قیر کمتر باشد، آسفالت تهیه شده از آن مقاومت باربری بیشتری دارد و هرچه نقطه نرمی قیر بیشتر باشد، قیر در دمای بالاتر کارایی خود را حفظ می‌کند. همچنین با افزایش مقادیر بنتونیت، مقدار حساسیت حرارتی کاهش یافته و شاخص نفوذ قیر افزایش یافت (حمیدی و همکاران، 1387).

در تحقیقی که توسط صادق پور انجام شد، خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی و فیزیکی قیر حاوی پلیمر SBS قبل و بعد از اضافه شدن نانو رس بر قیر بررسی شد. نتایج نشان داد، حضور نانو رس باعث بهبود قابل توجهی در مقاومت قیر پلیمری می‌شود،

بدون اینکه اثر سویی بر دیگر خصوصیات آن داشته باشد. با اضافه کردن نانو رس، نقطه نرمی، ویسکوزیته و شاخص نفوذ افزایش و درجه نفوذ کاهش یافت.

بنابراین، نانو رس می‌تواند خصوصیات کارایی بالای قیر پلیمری را افزایش دهد، همچنین مشخص شد با اضافه شدن نانو رس مدول کل برشی افزایش و زاویه فاز کاهش یافته که بر این اساس مقاومت شیارشدگی قیر افزایش می‌یابد (Sadehpoor and Galooyak, 2010).

پژوهش دیگری در سال 2011 توسط زانگ پینگ یو و همکارانش روی قیرهای اصلاح‌شده با نانو رس انجام گرفته است. در این پژوهش آزمایش‌های ویسکوزیته دورانی (RV) در دمای 80 تا 175 درجه سانتی‌گراد و رئومتر برشی دینامیکی برای اندازه‌گیری مدول کل تنش برشی  $G^*$  در محدوده دمایی 13 تا 70 درجه سانتی‌گراد بر روی قیرهای اصلاح‌شده با نانو رس انجام شده است که مقدار ویسکوزیته بین 41 تا 112 درصد افزایش و مقدار  $G^*$  نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است [You et al., 2011].

زیاری و همکارانش در سال 2012 به بررسی تأثیرات افزودنی بنتونیت بر روی خواص مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. آن‌ها ابتدا با انجام آزمایش‌های مختلف روی قیر اصلاح‌شده با 10٪، 15٪، 20٪، 25٪ و 30٪ بنتونیت نشان دادند که افزایش درصد بنتونیت منجر به کاهش درجه نفوذ و شکل‌پذیری قیر و افزایش نقطه نرمی و نیز PI آن می‌شود. زیاری و همکاران با انجام آزمایش مقاومت مارشال روی نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده با مقدار بهینه قیر اصلاح‌شده با درصدهای مختلف بنتونیت، به این نتیجه رسیدند که وجود بنتونیت در قیر باعث بهبود مقاومت مارشال و روانی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. آن‌ها مقدار بهینه بنتونیت در آزمایش‌های خود را برابر 20 درصد وزن قیر مشخص نمودند (Ziari et al. 2012).

تحقیقات انجام شده در سال 2012 توسط الشافی و همکاران بر روی قیر و مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانو رس نشانگر افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر و ویسکوزیته قیر در دمای 135 و 150 درجه سانتی‌گراد و افزایش مقاومت کششی در دمای منفی 7 و مثبت 25 درجه سانتی‌گراد است

(El-Shafie, Ibrahim and El Rahman. 2012). در سال 2014 زیاری و همکارانش تأثیر افزودنی بنتونیت بر رفتار خستگی در مخلوط‌های آسفالتی گرم را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود قیر با طبقه‌بندی درجه نفوذ 60-70 را با 10٪، 15٪، 20٪، 25٪ و 30٪ بنتونیت اصلاح‌کرده و از آن نمونه‌های آسفالتی گرم تهیه کردند. رفتار این نمونه‌ها توسط آزمایش‌های مختلف از جمله آزمایش مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمایش مدول برجهندگی و آزمایش خستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش خستگی از روش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای در شرایط کرنش کنترل‌شده با بارگذاری سینوسی صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی قیر اصلاح‌شده تا حداکثر 20 درصد بنتونیت مقادیر بیشتری را نسبت به نمونه شاهد دارا می‌باشند. افزودن 10٪ و 15٪ بنتونیت به قیر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد اما اصلاح قیر با بیش از این مقادیر تأثیری در عمر خستگی ندارند (Ziari et al. 2014).

همچنین آن‌ها در تحقیق دیگری با انجام آزمایش‌های خزش دینامیکی و اثر چرخ، تأثیر افزودنی بنتونیت بر رفتار شیار شدگی در مخلوط‌های آسفالتی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که اصلاح قیر مخلوط‌های آسفالتی گرم با بنتونیت تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت شیار شدگی و کاهش تغییر شکل‌های دائمی در دماهای بالا می‌شود (Ziari, Babagoli and Akbari. 2015). تحقیق دیگری که توسط عامری و همکارانش در سال 1394 انجام گرفت مربوط به بررسی تأثیر نانو رس روی تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی گرم است، بدین منظور از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره 4 آیین‌نامه روسازی ایران، پودر سنگ به‌عنوان فیلر، قیر 60-70 خالص و دو نوع نانو رس موتیموریونیت Cloisite 15A و Cloisite 30B استفاده شد. آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی در دو سطح تنش 300 و 450 Kpa و شیار جای چرخ در دمای 50 درجه برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی 2٪، 4٪ و 6٪ از هر نوع نانو رس بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند (عامری و همکاران، 1394). آن‌ها همچنین در تحقیق دیگری به ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی نانو رس پرداختند. در این پژوهش برای ارزیابی اثر نانو

رس آزمایش مارشال، آزمایش جوشان تگزاس به همراه پردازش تصویر بر روی نمونه‌های متراکم نشده، آزمایش حساسیت رطوبتی و آزمایش مدول برجهندگی بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی 2٪، 4٪ و 6٪ از هر نوع نانو رس و نمونه شاهد انجام گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با افزوده شدن نانو رس در برابر رطوبت را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، نمونه‌های حاوی نانو رس CA عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانو رس CB دارند (عامری و همکاران، 1394).

محققان مختلف به منظور ارزیابی و طراحی آسفالت بازیافتی سرد از آزمایش‌های متفاوتی شامل: آزمایش مقاومت مارشال (روش اوتاریو<sup>11</sup>)، آزمایش مقاومت ویم (روش ویم اصلاح شده و روش کالیفرنیا<sup>12</sup>)، آزمایش تعیین مدول ارتجاعی (روش چورون<sup>13</sup> و روش اورگون<sup>14</sup>)، آزمایش وزن مخصوص (روش مارشال اصلاح شده)، آزمایش کشش غیرمستقیم و نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک و نسبت مدول ارتجاعی در شرایط مرطوب به خشک (روش پنسیلوانیا<sup>15</sup>) استفاده می‌کنند (Suleiman, 2002؛ دیباج و کاوسی، 1391). هودکینسون و ویسر برای بررسی اثر فیلرهای فعال و همچنین جنکینز و همکارانش برای تعیین درصد قیر بهینه در مخلوط‌های سرد بازیافتی، از آزمایش ITS خشک و مرطوب استفاده کردند (Jenkins et al., 2004) (Hodgkinson and visser, 2004).

لوئیس و کالینگر نیز برای مقایسه خصوصیات مخلوط‌های سرد بازیافتی با کف قیر و قیر امولسیون از آزمایش‌های ITS در شرایط خشک و اشباع، آزمایش مقاومت مارشال، مقاومت فشاری و تعیین مدول ارتجاعی استفاده کردند (Lewis and Collings, 1999).

فورسبرگ و همکارانش برای طراحی مخلوط‌های سرد بازیافتی از چهار آزمایش استفاده کردند و از آزمایش ITS برای تعیین مقاومت مخلوط در برابر ترک‌های حرارتی بهره بردند، همچنین در این تحقیق از آزمایش‌های شن زدگی، مارشال و تعیین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی برای تعیین طرح اختلاط استفاده شد (Forsberg, Lukanen and Thomas, 2002). علاوه بر پرز و همکارانش، مارتینز و همکارانش نیز به منظور طراحی مخلوط‌های سرد بازیافتی از آزمایش ITS و

نسبت ITS اشباع به خشک استفاده کردند. (Martinez et al., 2007) [Perez et al., 2004]. توماس و کادرماس از چهار آزمایش شن زدگی، ITS، حساسیت در برابر رطوبت و مارشال برای بررسی عملکرد و خصوصیات مخلوط‌های سرد بازیافتی استفاده کردند (Thomas and Kadrmas, 2003).

### ۳- روش تحقیق

به منظور اصلاح خواص قیر امولسیونی با استفاده از رس و تولید امولسیون رسی، دو نوع خاک بنتونیت استفاده شده است که در اینجا به صورت اختصاری بنتونیت S1 و بنتونیت S2 نامیده می‌شوند و خصوصیات آن‌ها در جدول 1 ارائه شده است. در این کار تحقیقاتی، ساخت امولسیون رسی با درصد‌های 3، 3/5، 4، 4/5 و 5 بنتونیت، به عنوان عامل امولسیون ساز، به روش آزمایشگاهی و توسط دستگاه هموژنایزر انجام پذیرفت. برای ساخت امولسیون رسی ابتدا مخلوط فاز آبی شامل آب و اسید و بنتونیت با محدوده دمایی 75-80 درجه سانتی‌گراد آماده و سپس قیر داغ با دمای تقریبی 120 درجه سانتی‌گراد به تدریج اضافه می‌گردد (خاوندی، آین و اجلالی، 1392). در ابتدا ساخت امولسیون رسی و پارامترهای مؤثر در آن من جمله PH بهینه و درصد مواد متشکله مورد بررسی قرار گرفت و چندین فرمولاسیون تهیه گردید و پس از انجام آزمایش الک به عنوان معیار کیفیت، امولسیون‌های رسی مطابق جدول 2 تهیه شدند. در ساخت این نوع امولسیون از مواد اولیه شامل قیر 60-70، امولسیفایر بنتونیت، مواد افزودنی نظیر اسیدسولفوریک 10٪، کربنات سدیم و کربکسی متیل سلولز صنعتی استفاده گردید.

به منظور ساخت نمونه‌های آسفالت بازیافتی سرد، درصد قیر بهینه و درصد آب بهینه به روش موسسه آسفالت به ترتیب برابر 3/5 و 3 درصد وزن مخلوط تعیین شدند.

درصد سیمان مورد استفاده به منظور کسب مقاومت اولیه برای کلیه نمونه‌ها برابر 1/5 درصد مشخص گردید. در ادامه 99 نمونه آسفالت بازیافتی با ابعاد به قطر 102 میلی‌متر و ارتفاع 64 میلی‌متر با استفاده از امولسیون‌های رسی تولید شده و یک نمونه امولسیون کاتیونیک رایج به عنوان نمونه شاهد تهیه شد.



جدول 1. آنالیز شیمیایی و خواص فیزیکی دو نوع بتونیت مورد استفاده

عنصر	بتونیت S1 (درصد)	بتونیت S2 (درصد)
Na <sub>2</sub> O	5/78	2/14
MgO	2/81	2/93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10/6	11/59
SiO <sub>2</sub>	54/6	63/14
CaO	2/330	3/03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1/690	2/54
سایر عناصر	22/19	14/63
حد خمیری	35/5	31
حد روانی	167/5	172/5
وزن مخصوص	2/11	2/02

جدول 2. مواد تشکیل دهنده نمونه‌های امولسیون رسی تولید شده برحسب درصد

شماره نمونه	آب	قیر خالص	بتونیت S1	بتونیت S2	اسید	کربنات سدیم
S1.30	46/85	50	3/0	-	0/1	0/05
S1.35	46/3	50	3/5	-	0/15	0/05
S1.40	45/75	50	4/0	-	0/2	0/05
S1.45	45/25	50	4/5	-	0/2	0/05
S1.50	44/65	50	0/5	-	0/31	0/05
S2.30	46/8	50	-	3/0	0/15	0/05
S2.35	46/3	50	-	3/5	0/15	0/05
S2.40	45/8	50	-	4	0/15	0/05
S2.45	45/23	50	-	4/5	0/22	0/05
S2.50	44/65	50	-	5	0/27	0/05

نوع بتونیت به کاررفته در ساخت امولسیون رسی نام گذاری شدند؛ برای مثال نمونه ساخته شده با استفاده از امولسیون رسی که از 5 درصد امولسیفایر بتونیت نوع 2 تشکیل شده است، به صورت S2.50 نام گذاری شده است.

نمونه‌ها با 50 ضربه چکش مارشال در هر طرف متراکم شده و به مدت 6 ساعت در دمای 60 درجه سانتی‌گراد و سپس به مدت 12 ساعت در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. نمونه‌ها برحسب درصد رس موجود در ترکیب قیر امولسیون و همچنین

## ۴- ارایه نتایج و تحلیل

### 4-1- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

این آزمایش بر روی نمونه‌ها در شرایط خشک (25 درجه سلسیوس) و اشباع با استفاده از استاندارد AASHTO-T283 انجام گردید. به منظور ایجاد شرایط رطوبتی اشباع، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در آب 25 درجه سلسیوس قرار داده شدند و قبل از انجام آزمایش سطح نمونه‌ها خشک شد.

بر اساس نتایج این آزمایش مقاومت کششی خشک و اشباع در نمونه‌های مخلوط آسفالت بازیافتی ساخته شده با امولسیون رسی روند افزایش را طی می‌کنند به طوری که مقدار مقاومت برای نمونه امولسیون حاوی 4/5 درصد بتونیت، از نمونه شاهد بسیار بیشتر می‌باشد؛ این در حالی است که نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع به حالت خشک (TSR) با افزایش مقدار امولسیفایر بتونیت روند کاهشی را طی می‌کند و مقدار آن برای نمونه‌های بیش از 3 درصد بتونیت، از حداقل مقدار مجاز TSR (75 درصد) کمتر است.

رسی مشخص، 3 نمونه در حالت خشک و 3 نمونه در حالت مرطوب انتخاب و هرکدام از نمونه‌ها دو مرتبه در جهت‌های مختلف با اختلاف زاویه 90 درجه مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌طور کلی 132 بار آزمایش مدول برجهندگی بر روی 66 نمونه انجام شد و میانگین مدول‌های برجهندگی به دست آمده به‌عنوان مدول برجهندگی هرکدام از گروه نمونه‌ها لحاظ گردید.

بر اساس نتایج این آزمایش نمونه‌های ساخته شده از امولسیون رسی، مدول برجهندگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته و با افزایش میزان بتونیت موجود در امولسیون رسی تا 4/5 درصد، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد هرچند این افزایش چندان قابل توجه نیست. همگی نمونه‌ها در شرایط رطوبتی با کاهش شدید مدول برجهندگی مواجه می‌شوند ولی این کاهش برای نمونه‌های ساخته شده از امولسیون رسی بیشتر از نمونه شاهد است و با افزایش میزان بتونیت موجود در امولسیون رسی، شدت می‌یابد.

### 4-3- آزمایش استقامت مارشال

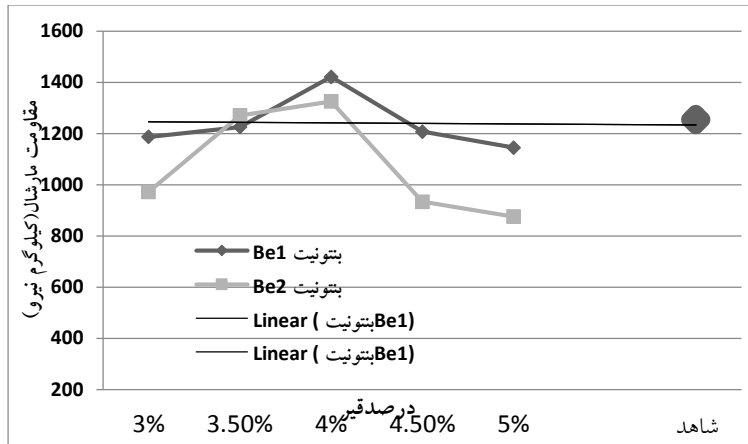
این آزمایش مطابق روش ASTM D6927 روی نمونه‌های آسفالت بازیافتی با امولسیون کاتیونیک و فاقد افزودنی تحت عنوان نمونه شاهد و نمونه‌های بازیافت شده با قیر امولسیون رسی انجام گردید. برای هر نوع مخلوط بازیافت سرد، 3 نمونه آسفالتی مارشال در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و نرخ بارگذاری 51 میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت.

بر اساس نتایج آزمایش استقامت مارشال، مطابق شکل (4)، برای نمونه‌های ساخته شده با امولسیون رسی حاوی کمتر از 4/0 درصد بتونیت روند افزایشی را طی می‌کنند به گونه‌ای که مقدار استقامت مارشال برای نمونه‌های حاوی 4/0 درصد از هر دو نوع بتونیت، از استقامت مارشال نمونه شاهد بیشتر است. برای نمونه‌های آسفالت بازیافتی با امولسیون حاوی بیش از 4/0 درصد بتونیت، استقامت مارشال کاهش یافته و روند نزولی را طی می‌کند.

### 4-2- آزمایش مدول برجهندگی

این آزمایش بر روی نمونه‌های آسفالت سرد بازیافتی، با استفاده از دستگاه UTM-14P طبق استاندارد ASTM D4123-82/AASHTO TP31 انجام شد. این آزمایش در دمای 20 درجه سانتی‌گراد و شکل بارگذاری نیمه سینوسی با مدت زمان اعمال بار 250 میلی‌ثانیه و زمان استراحت 3000 میلی‌ثانیه انجام شد. تعداد پیش بارگذاری برابر 5 سیکل و بار اعمالی برابر 3800 نیوتن در نظر گرفته شد.

ضریب پواسون نیز برابر با 0/5 انتخاب گردید. مدول برجهندگی برای تشخیص کاهش سختی انتخاب می‌شود و بار فشاری قطری برای تعیین استحکام کششی نمونه به آن وارد می‌گردد. مدول برجهندگی بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام گرفت، این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM، انجام می‌شود. در این آزمایش از هر گروه نمونه آسفالتی ساخته شده با امولسیون



شکل 4. مقایسه نتایج مقاومت مارشال در درصدهای مختلف

## 5- نتیجه گیری

مهم‌ترین نتایج این پژوهش که بر اساس رساله کارشناسی ارشد با همین عنوان نگاشته شده است به شرح ذیل می‌باشد:

- 1- استفاده از امولسیون رسی در بازیافت سرد باعث بهبود خواص مقاومتی و دوام مخلوطها می‌شود ولی افزایش بیش از اندازه‌ی آن اثرات منفی بر این پارامترها دارد.
- 2- بازیافت سرد آسفالت با امولسیون‌های رسی با مقدار بنتونیت کمتر از 4 درصد منجر به افزایش استقامت باربری و مقاومت در برابر شیارشدگی در این مخلوطها می‌شود.
- 3- مخلوطهای آسفالتی سرد بازیافتی با امولسیون رسی مقاومت کمی در برابر رطوبت از خود نشان می‌دهند و با افزایش مقدار بنتونیت در امولسیون این حساسیت بیشتر می‌شود که ممکن است به علت احتمال امولسیون شدن مجدد باشد.

- 6- Set
- 7- High Float
- 8- Bending Beam Rheometer
- 9- Rolling Thin Film Oven
- 10- Pressure Aging Vessel
- 11- Ontario Method
- 12- California Method
- 13- Chevron Method
- 14- Oregon Method
- 15- Pennsylvania Method

## 7- مراجع

- بذرافشان، ب. (1388)، "طراحی و ارزیابی مخلوطهای بازیافتی سرد امولسیونی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، ص. 11-19.
- حمیدی، ی.، صراف، الف. و طهمورسی، م. (1387) "اثر بنتونیت بر قیر لاستیکی"، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی سهند، مهرماه، تبریز، ایران.
- خاوندی، ع.ر.، آین، و.، اجلالی، ب. (1392)، "بررسی خواص امولسیون های قیری رسی تولید شده در داخل کشور"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل 5 (3)، ص. 303-316.

## 6- پی نوشتها

- 1- Reclaimed Asphalt Pavement
- 2- Cold Recycling
- 3- Virgin Aggregate
- 4- Hot Mix Asphalt
- 5- Breaking

-Dwarapudi, S., Rao, S.M., Murthy, J.V.S.N., Parida, D.D. and Raju, K.S., (2008), "Effect of activated bentonite on properties of green and fired chromite pellets. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(4), pp.308-314.

- El-Shafie, M., Ibrahim, I. M. and El Rahman, A. M. M. (2012), "The addition effects of macro and nanoclay on the performance of asphalt binder", *Egyptian Journal of Petroleum*, Volume 21, Issue 2, pp. 149-154.

- Ghafarpoor, S. Andalibizade, B., & Vossough, S.H. (2010), "Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures". *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 35, Number 1B.

- Ghile, D.B., (2006), "Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures". Delft, the Netherlands: Delft University of Technology.

- Goh, S. W., Akin, K., You, Z. and Shi X. (2011), "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro or nano-modified asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, No 25, pp. 195-200

- James, A., (2010), "Clay stabilized asphalt emulsions", *akzo nobel surface chemistry llc*, pp. 5.

- Khodadadi, A. and Kokabi, M., (2007), "Effect of Nanoclay on Long-Term Behavior of asphalt concrete pavement". In 2st Congress of Nanomaterials, University of Kashan, Iran.

- Kotal, M. and Bhowmick, A.K., (2015), "Polymer nanocomposites from modified clays: Recent advances and challenges". *Progress in Polymer Science*, 51, pp.127-187.

- Khabiri, M.M., 2006. Development of a mathematical model for increasing flexible pavement life cycle under preventive maintenance (Doctoral dissertation, Ph. D Thesis, Iran Science and Technology University), 270 pages.

- Lee, K.W., Brayton, T.E., Mueller, M. and Singh, A., (2016), "Rational mix-design procedure for cold in-place recycling asphalt mixtures and performance prediction". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), p.04016008.

- Ndinyo, C.S., Gariy, A. and Mulei, S.M., (2017), "Suitability of a mix of reclaimed asphalt concrete, virgin aggregates and a cationic emulsion as a cold mix surfacing for low volume roads", *Proceedings of the JKUAT Scientific Technological and*

- خدادادی، ا.، سوداگری، ج.، اصلانی، ا.ح.، صالحی، ح.، (1391)، "تاثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد نانو رس در عملکرد خستگی مخلوطهای آسفالتی" فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره 13، ص. 71.

- دیباج، س.م.، کاووسی، ا.، (1391)، "روشی برای طرح اختلاط و بهینه سازی مخلوطهای آسفالت بازیافتی امولسیون"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل 4 (1)، ص. 23-34.

- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش تحقیقات و فناوری اطلاعات، (1385)، "مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت، نشریه شماره 339"، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله.

- عامری، م.، وامق، م.، روح الامینی، ح.، بمانا، ک.، (1394)، "ارزیابی اثر نانو رس بر رفتار تغییر شکل دائم مخلوطهای آسفالتی گرم (HMA)"، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره 15، شماره 3، ص. 149-158.

- عامری، م.، وامق، م.، روح الامینی، ح.، بمانا، ک.، (1393)، "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوطهای آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال 6، شماره 4، ص. 613-626.

- غفارپور جهرمی، س.، مرتضوی، م.ر.، وثوق، ش.، و احمدی، ن.ا.، (1389)، "تاثیر نانورس بر رفتار خستگی و تغییر شکل ماندگار قیر"، مهندسی حمل و نقل 2-1، ص. 51-64.

- وزارت راه و شهرسازی، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری (1385)، "روشهای بازیافت سرد و گرم آسفالت و امکان سنجی اقتصادی آن در ایران"، تهران، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل.

Ali, A., (2017), "Environmental Impacts of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)" (Doctoral dissertation, Columbia University).

- Alan, M.H., Asphalt Cold Mix Ltd, (1925), "Bituminous emulsion". U.S. Patent 1, pp.542,626.

of EVA/asphalt nanocomposites". *European Polymer Journal*, 46(4), pp.621-633.

- Yeung, E., (2017), "Exploring Compaction Effects on Cold In-Place Recycling Mixtures using Emulsified Asphalt" (Doctoral dissertation, University of Arkansas).

- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S.W., (2011), "Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization". *Construction and Building Materials*, 25(2), pp.1072-1078.

- Yu, J., Zeng, X., Wu, S., Wang, L. and Liu, G., (2007), "Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts", *Material Science and Engineering, A* 447 (1-2), pp. 233–23.

- Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A. and Ebrahimi-Nejad, S., (2010), "Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate Nano particles", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 7, July 2010, pp. 1239–1244.

- Ziari, H., Divandari, H., Babagoli, R., Akbari, A., (2012), "Influence of bentonite additive on bitumen and asphalt mixture properties". *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 6(8), pp.629-634.

- Ziari, H., Babagoli, R., Ameri, M. and Akbari, A., (2014), "Evaluation of fatigue behavior of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite modified bitumen". *Construction and Building Materials*, 68, pp.685-691.

- Ziari, H., Babagoli, R. and Akbari, A., (2015), "Investigation of fatigue and rutting performance of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite-modified bitumen". *Road Materials and Pavement Design*, 16(1), pp.101-118.

Industrialization Conference held at AICAD Center in Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, Nairobi, Kenya., pp. 388-398.

- Orešković, M., Bressi, S., Di Mino, G. and Presti, D.L., (2017), "Influence of bio-based additives on RAP clustering and asphalt binder rheology". Tenth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, At Athens, Greece. pp. 1301-1306.

- Pinnavaia, T.J. and Beall, G.W. eds., (2000), "Polymer-clay Nano composites". John Wiley. USA, ISBN 0471637009.

- Rogge, D.F., Gicks, R.G., Scholz, T.V. and Allen, D., (1992), "Use of Asphalt Emulsions for In-Place Recycling: Oregon Experience". *Transportation Research Record*.

- Sadeghpour, S., Galooyak, B., Dabir, A. Nazarbeygi, E. and Moeini, A. (2010) "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites". *Construction and Building Materials* 24, pp. 300–307.

- Salomon, D.R., (2006), "Asphalt emulsion technology". *Transportation Research Board, Characteristics of Bituminous Materials Committee*, Washington, DC., pp 3.

- Shell Bitumen, (1995), "The shell bitumen industrial handbook". Thomas Telford. pp. 120-135.

- Suleiman, N., (2002), "A state-of-the-art review of cold in-place recycling of asphalt pavements in the Northern Plains region," University of North Dakota, Department of Civil Engineering, North Dakota Department of Transportation Bismarck, ND, USA.

- Sureshkumar, M.S., Filippi, S., Polacco, G., Kazatchkov, I., Stastna, J. and Zanzotto, L., (2010), "Internal structure and linear viscoelastic properties

# Experimental Evaluation of Cold Recycled Asphalt with Clay Bitumen Emulsion

*M. Kalantari Sarcheshme, M.Sc. Student, Civil Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.*

*M. M. Khabiri, Associate Prof., Civil Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.*

*H. khani sanij, Assistant Prof., Civil Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.*

*E-mail: [mkhabiri@yazd.ac.ir](mailto:mkhabiri@yazd.ac.ir)*

Received: June 2016-Accepted: Sep. 2016

## **ABSTRACT**

Researches show that the modification of bitumen with clay can enhance functional properties of asphalt mixtures, such as its resistance to heat, stability and flow. To use this characteristic of clay in cold recycled asphalt we can use clay modified bitumen emulsions. In these research two different types of bentonite is used to emulsify bitumen. Clay modified bitumen emulsion samples were made in laboratory and the agitation was provided by a high speed mixer. After quality control tests conducted, cold recycled asphalt samples were made with obtained emulsions. These samples were evaluated through functional tests such as Marshal Stability test, Indirect Tensile Strength and resilient modules in dry and saturated conditions. The results show that despite of improvements in resistance and strength characteristics of cold recycled asphalt with clay modified bitumen emulsions, they show weak performance in moisture conditions.

**Keywords:** Clay Modified Emulsion, Bentonite, Cold Recycling, Functional Properties, Asphalt Mixture