



Semnan University



Research Article

Laboratory comparison of mechanical properties of emulsified cold recycled asphalt containing cement kiln dust and steel slag with recycled asphalt containing cement

Amouzadeh Omrani, M. *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-05-06

Revised: 2023-11-12

Accepted: 2023-11-21

Keywords:

Emulsified cold recycled mixture;

Mechanical properties;

Cement kiln dust;

Steel slag;

Cement.

ABSTRACT

Cold recycling is one of the methods of pavement rehabilitation, which has become popular in recent years. One of the advantages of cold recycling is that its operations are performed at ambient temperature. However, these pavements are susceptible to problems such as raveling, stripping, low initial strength, and long curing time, which are often countered by the use of additives. In this study, the mechanical behavior of the mixture recycled with emulsion bitumen containing cement kiln dust as a waste from the cement production process and steel slag as a pozzolanic waste were compared with the non-additive mixture and the mixtures with 1% and 2% cement content (as a conventional emulsified cold recycled mixture additive). To evaluate the mechanical properties, the mix design was carried out using modified Marshall method and after obtaining the optimum bitumen-water content and ambient curing of the samples, Marshall stability, indirect tensile strength and resilient modulus were performed on the samples of different ages (7-day and 42-day) at three different temperatures (25, 5 and -5 °C) and fatigue test was performed for 42-day age samples at 25 °C. Results showed that the combined use of 3% cement kiln dust and 3% steel slag (by total mixture weight) improves the mechanical properties, especially after prolonged curing periods. In some cases, this improvement was even greater than the improvement resulting from the addition of cement. The fatigue test results showed that the mixture containing the new additive had a better fatigue behavior than the non-additive mixture and a comparable behavior with the cement-containing mixture especially at the strain levels applied to the pavement base layer (below 200 microstrains).

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.30574.1641>

مقاله پژوهشی

* Corresponding author.

E-mail address: Mo.Omrani@iaau.ac.ir

How to cite this article: Amouzadeh Omrani, M. (2023). Laboratory comparison of mechanical properties of emulsified cold recycled asphalt containing cement kiln dust and steel slag with recycled asphalt containing cement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), 57-79. doi: [10.22075/jtie.2023.30574.1641](https://doi.org/10.22075/jtie.2023.30574.1641)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقایسه آزمایشگاهی خواص مکانیکی آسفالت سرد بازیافت شده با قیر امولسیون حاوی گرد کوره سیمان و سرباره فولاد با آسفالت بازیافتی حاوی سیمان

محسن عموزاده عمرانی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶	بازیافت سرد یکی از روش‌های ترمیم روسازی است، که در سال‌های اخیر رواج یافته است. انجام فرآیندهای بازیافت سرد روسازی در دمای محیط یکی از برتری‌های این روش می‌باشد. با این حال، لایه‌های روسازی آسفالتی بازیافت شده با امولسیون معمولاً با مشکلاتی مانند شن‌زدگی، عریان‌شدگی، مقاومت اولیه کم و زمان عمل‌آوری طولانی مواجه می‌شوند. به منظور غلبه بر این مشکلات از افزودنی‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله، رفتار مکانیکی مخلوط بازیافت شده با قیر امولسیون حاوی ترکیب گرد کوره سیمان به عنوان یک پسماند حاصل از فرایند تولید سیمان و سرباره فولاد به عنوان یک پسماند پوزولانی، با مخلوط بدون افزودنی و مخلوط‌های حاوی ۱٪ و ۲٪ افزودنی سیمان به عنوان یک افزودنی متداول در تکنولوژی بازیافت سرد امولسیونی، مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور، طرح اختلاط به روش مارشال اصلاح شده انجام و پس از به دست آوردن میزان قیر بهینه و آب بهینه و عمل‌آوری محیطی نمونه‌ها، از آزمایش‌های استقامت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی در دماهای ۲۵، ۵ و ۰- درجه سلسیوس و خستگی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۴۲ روز استفاده شد. نتایج نشان داد که ترکیب ۳٪ گرد کوره سیمان و ۳٪ سرباره فولاد (نسبت به وزن مخلوط آسفالتی)، خواص مکانیکی مخلوط را مخصوصاً در زمان‌های عمل‌آوری بیشتر ارتقا می‌دهد. این ارتقا در بعضی موارد حتی نسبت به افزودنی سیمان هم بیشتر بود. نتایج آزمایش خستگی نشان داد که مخلوط حاوی افزودنی ترکیبی جدید، به‌طور واضح، رفتار بهتری نسبت به مخلوط بدون افزودنی و رفتار قابل مقایسه‌ای با مخلوط حاوی سیمان، مخصوصاً در سطوح کرنش وارده به لایه اساس روسازی (کمتر از ۲۰۰ میکرواسترین)، دارد.
واژگان کلیدی: مخلوط بازیافتی امولسیونی، خواص مکانیکی، گرد کوره سیمان، سرباره فولاد، سیمان.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.30574.1641>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mo.Omrani@iau.ac.ir

استناد به این مقاله: عموزاده عمرانی، محسن. (۱۴۰۲). مقایسه آزمایشگاهی خواص مکانیکی آسفالت سرد بازیافت شده با قیر امولسیون حاوی گرد کوره سیمان و سرباره فولاد با آسفالت بازیافتی حاوی سیمان. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل. ۹(۳)، ۳۹-۵۶. doi: 10.22075/jtie.2022.27571.1604

۱. مقدمه

بازیافت سرد، یک تکنولوژی در صنعت روسازی است، که شامل ترمیم روسازی‌های آسفالتی با استفاده دوباره از مصالح در دمای محیط و در نتیجه کاهش مواردی چون پسماند، استفاده از انرژی، مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. از سوی دیگر، کاهش معادن مصالح سنگی با کیفیت بالا به‌طور جدی ساخت، تعمیر و نگهداری در صنعت روسازی را محدود می‌کند، که باعث بروز مشکلات کمبود منابع و زیست‌محیطی می‌شود (آزادگله و همکاران، ۲۰۲۲). در این روش، ابتدا روسازی بتن آسفالتی توسط ماشین آسفالت‌تراش، تراشیده می‌شود و سپس با قیر امولسیون و آب ترکیب شده و در برخی موارد از سنگدانه‌های جدید و افزودنی نیز استفاده می‌شود. این عملیات در دمای محیط انجام می‌گردد (گائو و همکاران، ۲۰۱۴). از دیدگاه فنی، از آنجا که در این روش به اعمال حرارت نیازی نیست، قیر مورد استفاده دچار پیرشدگی اولیه نمی‌شود. همچنین، عملیات اجرایی بازیافت سرد نسبت به سایر روش‌های سنتی ترمیم روسازی بتن آسفالتی، به زمان کمتری نیازمند است (Wirtgen GmbH, ۲۰۱۰).

در روش بازیافت سرد، از مصالح خرده آسفالتی (RAP)^۱ استفاده می‌شود. RAP از احیای تمام عمق یا آسیاب کردن روسازی‌های مضمحل آسفالتی به‌دست می‌آید (تیان و همکاران، ۲۰۲۲). به‌کارگیری RAP با حجم زیاد در مخلوط‌های بازیافتی نه تنها از انباشت ضایعات جلوگیری می‌کند، بلکه میزان استفاده از سنگدانه‌های جدید و تولید قیر را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب می‌تواند هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد و هم به حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست کمک کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که لایه‌های روسازی آسفالتی بازیافت شده

با امولسیون معمولاً با مشکلاتی از جمله شن‌زدگی، ترک‌های حرارتی و خستگی، شیارشدگی، مقاومت اولیه کم و زمان عمل‌آوری طولانی مواجه می‌شوند، که به‌منظور غلبه بر این مشکلات از افزودنی‌ها استفاده می‌شود. معمولاً سیمان، آهک و خاکستر بادی به عنوان افزودنی در مخلوط‌های بازیافت شده با امولسیون استفاده می‌شوند. در این میان، سیمان متداول‌ترین است.

گرد کوره سیمان (CKD)^۲ یک ماده ضایعاتی و پودری نرم (معمولاً دارای ۸۰ تا ۹۰ درصد عبوری از الک ۹۰ میکرومتر) است که در آخر فرآیند تولید سیمان، به صورت سرباره از دودکش‌ها برداشته شده، در بگ‌هاوس و یا رسوب‌گیرهای الکترواستاتیک جمع‌آوری می‌شود. بخشی از CKD که قابل بازگشت به فرآیند تولید سیمان نیست و یا امکان استفاده مفید در جایی دیگر را دارد، در انبارها و یا محل‌های دفن زباله قرار داده می‌شود (قوامی و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از CKD در آسفالت، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفع آن را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد و ایجاد صرفه‌جویی عمده‌ای در هزینه و مصرف انرژی در صنعت سیمان نماید (عبدالواحد و النقیم، ۲۰۱۶).

ضایعات و مواد پسماند به‌دست آمده از کارخانجات صنعتی و معادن باعث افزایش نیاز به محل دپوی مواد پسماند شده‌اند. بهره‌گیری از این مواد ضایعاتی به عنوان افزودنی‌های مؤثر در مخلوط آسفالتی، علاوه بر حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست، می‌تواند تأثیر شگرفی در صرفه‌جویی هزینه ساخت روسازی به همراه داشته باشد. مطالعات نشان می‌دهند که مواد ضایعاتی در صورت داشتن خاصیت پوزولانی می‌توانند به عنوان یک افزودنی به همراه یک فعال‌کننده مانند CKD باعث بهبود عملکرد مخلوط بازیافتی شوند. سرباره فولاد یکی از همین مواد ضایعاتی است که محصول جانبی صنعت آهن و فولاد می‌باشد و با توجه به سیلیس آمورف، از خاصیت

^۱- Reclaimed Asphalt Pavement

^۲- Cement Kiln Dust

نمونه‌های دارای ترک و بدون ترک استفاده کردند. همچنین، روش مکانیک شکست را برای مطالعه مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی بدون افزودنی و حاوی افزودنی‌های الیاف بازالت و SBR به کار بردند. نتایج آزمایش، بهبود قابل توجهی را در انرژی شکست و ضریب شدت تنش مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی امولسیون‌ی اصلاح‌شده با الیاف بازالت و SBR بازیافت سرد نشان داد، که بیانگر آن بود که هر دو افزودنی الیاف بازالت و SBR می‌توانند خطر ترک‌خوردگی مخلوط آسفالت بازیافتی امولسیون‌ی را کاهش دهند. در این میان، الیاف بازالت مؤثرتر واقع شدند.

در پژوهش‌های مختلف، از گرد کوره سیمان بسیار در ساخت مخلوط‌های بتنی و نیز تا حد زیادی در تثبیت لایه‌های غیرآسفالتی راه استفاده شده است؛ ولی تحقیقات کمی در مورد مخلوط‌های آسفالتی، مخصوصاً در حیطه بازیافت سرد، صورت گرفته است. CKD می‌تواند به عنوان یک عامل فعال‌کننده برای ضایعات صنعتی مانند سرباره مس، سرباره کوره آهن و موارد مشابه استفاده شود. گرد کوره سیمان به دلیل دارا بودن میزان زیادی آهک، قابلیت جایگزینی آهک هیدراته جهت کاهش خرابی‌های رطوبتی در روسازی را دارد (صدیق، ۲۰۰۸). افزودن CKD به قیر سبب کاهش انعطاف‌پذیری ماستیک قیری شده، مقاومت در برابر عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی را سبب می‌شود (بولدن، ۲۰۱۳). در پژوهش مدرس و همکاران (۲۰۱۵) خواص ضدعریان‌شدگی با آزمایش روی چسبنده قیری حاوی افزودنی‌های مختلف شامل گرد کوره سیمان، خاکستر بادی کلاس C و F و مایع ضدعریان‌شدگی و مخلوط آسفالتی حاوی این افزودنی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نسبت مقاومت کششی^۲ (TSR) برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی گرد کوره سیمان بیشتر از مخلوط کنترلی (بدون افزودنی) بود (بویز، ۲۰۱۱). انجام آزمایش تیر چهارنقطه‌ای روی

پوزولانی برخوردار است. سرباره از آهک، سیلیس، آلومین و مقادیری اکسیدهای آهن، اکسید منیزیم و اکسیدهای قلیایی تشکیل شده است. هر ساله حدود ۲۵۰ هزار تن سرباره در اصفهان تولید می‌شود، که حاوی مواد ترکیبات باارزشی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آهن، فسفر، منگنز و سیلیسیم می‌باشد. در حال حاضر، این مواد بدون استفاده می‌ماند، که علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی، خطرات بالقوه زیست‌محیطی را نیز در پی دارد (عموزاده عمرانی و حصیرچیان، ۲۰۲۰). بنابراین، در صورت استفاده از این مواد می‌توان تا اندازه‌ای از هزینه‌های تحمیلی جهت نگهداری و انتقال آنها کاست.

۲. مطالعات پیشین

تجربیات گذشته نشان داده که عملکرد بهتر لایه‌های بازیافت شده، با انتخاب درست نوع افزودنی، حاصل خواهد شد (کراس و یانگ، ۱۹۹۷؛ توماس و همکاران، ۲۰۰۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲).

رفتار مکانیکی و عملکرد مخلوط‌های بازیافتی امولسیون‌ی تا حد بسیار زیادی به خواص و مقدار هر یک از عوامل چسبانندگی^۱ بستگی دارد (عباس‌نژاد و مدرس، ۲۰۲۰). افزودنی‌های مختلفی نظیر خاکستر بادی، سیمان و آهک به منظور اصلاح ویژگی‌های تغییرشکلی در زمان‌های اولیه ساخت، افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه، کاهش زمان عمل‌آوری، پخش یکنواخت قیر و جلوگیری از خرابی‌های زودرس استفاده می‌شوند (Wirtgen GmBH، ۲۰۱۰). سیمان و آهک معمولاً به مقدار ۱ تا ۳ درصد وزن مصالح خرده آسفالتی به مخلوط بازیافتی اضافه می‌گردند (مارتینز اچوریا و همکاران، ۲۰۱۲). لیو و همکاران (۲۰۲۳)، مخلوط آسفالت بازیافتی امولسیون‌ی حاوی الیاف بازالت و همچنین اصلاح‌شده با پلیمر SBR را به عنوان اهداف تحقیق خود انتخاب کرده و از تست‌های مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای و خستگی روی

²- Tensile Strength Ratio

¹- Binding Agents

اشباع آب، ایجاد یک ماتریس شبه‌سیمانی^۳ می‌کند، زیرا حاوی آهک آزاد (CaO) است. با توجه به وجود آب در مخلوط‌های امولسیونی، این فرایند می‌تواند باعث بهبود خواص این مخلوط‌ها شود. سرباره فولاد می‌تواند به‌عنوان یک افزودنی در بتن، آسفالت و مصالح اساس استفاده شود (بولدن، ۲۰۱۳). استفاده از سرباره فولاد در مخلوط‌های بازیافتی به‌ندرت صورت گرفته، که آن هم به‌عنوان جایگزین مصالح درشت‌دانه و ریزدانه است و پژوهش خاصی دال بر استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان افزودنی در مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی انجام نشده است. در پژوهش جنگ و همکاران (۲۰۱۵)، از مقادیر مختلف سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین بخش ریزدانه مصالح استفاده شد. در این تحقیق، نمونه‌های حاوی سرباره فولاد حدود ۲۰٪ افزایش در استقامت مارشال و حدود ۳۰٪ کاهش روانی را نسبت به نمونه‌های دارای سنگ آهک نشان دادند، که بیانگر تأثیر مثبت سرباره بر مقاومت و سفتی مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی است؛ همچنین، باعث افزایش چسبندگی میان قیر، مصالح سنگی و سرباره و نیز قفل‌ویست دانه‌ها و در نهایت، افزایش مدول برجهنگی شده است. ناصر و همکاران (۲۰۲۳) از دو افزودنی فیلر سرباره فولاد و دوده سیلیس^۴ (SF)، در چهار درصد وزنی مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نسبت به وزن بخش فیلر) در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی ساخته‌شده با RAP استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان‌دهنده اثربخشی استفاده از چنین افزودنی‌هایی به‌عنوان فیلر بود. با افزایش سطح RAP، استقامت مارشال برای مخلوط‌های تهیه‌شده با سرباره فولادی از ۱۱/۷۳ تا ۳۲/۷۳ کیلونیوتن بهبود نشان داد. اگرچه استفاده از سرباره فولاد در مجاورت آب باعث کاهش نتایج استقامت شد؛ با این وجود، معیارهای مدنظر استانداردهای ASTM برآورده شد.

مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی گرد کوره سیمان در دماهای ۲۰، صفر، ۱۰- و ۲۰- نشان داد که عمر خستگی این مخلوط‌ها در یک سطح کرنش مشخص، با کاهش دما کاهش می‌یابد. در بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه، مخلوط‌های حاوی CKD بیشترین عمر خستگی را نسبت به مخلوط‌های کنترلی حاوی فیلر سنگ آهک نشان دادند. در پژوهش عبدالواحد و النقیم (۲۰۱۶)، CKD به‌عنوان فیلر در مخلوط آسفالت سرد امولسیونی (CBEM)^۱ استفاده شد. نتایج نشان داد که با جایگزین کردن فیلرهای معدنی با CKD، مدول سفتی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، مخلوط‌های دارای CKD خصوصیات خستگی مشابهی با مخلوط‌های سرد حاوی فیلر سنگ آهک و مخلوط آسفالت گرم دارند. بنابراین، می‌تواند به‌عنوان جایگزین سیمان یا سنگ آهک در مخلوط سرد امولسیونی استفاده شوند، که بدین ترتیب مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست نیز خواهند بود. دولیمی و همکاران (۲۰۲۲) از خاکستر لجن کاغذ^۲ (PSA) و CKD به‌عنوان جایگزینی برای فیلرهای معدنی متداول به‌ترتیب با مقادیر صفر تا ۶٪ و صفر تا ۴٪ استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که ترکیب این مواد زائد، بهبود قابل توجهی را در سفتی و مقاومت مخلوط نشان می‌دهد. واکنش سیمانی PSA باعث ایجاد پیوند در داخل مخلوط‌ها شد. از طرف دیگر، CKD به‌عنوان یک افزودنی برای فعال کردن فرآیند هیدراتاسیون PSA عمل کرد.

در ایران، بیشتر سرباره‌های فولاد تولید شده در کارخانجات فولاد اصفهان و اهواز معمولاً جهت دفع به محل‌های دفن زباله فرستاده می‌شود، که می‌تواند سبب مشکلات شدید زیست‌محیطی گردد. سرباره فولاد دارای کاربردهای مختلفی در ساخت راه از قبیل مصالح اساس، رویه آسفالتی و بتنی است. سرباره فولاد، پس از تراکم و

³- Semi cementitious

⁴- Silica Fume

¹- Cold Bituminous Emulsion Mixture

²- Paper Sludge Ash

افزودنی متداول در بازیافت سرد جهت مقایسه و آب. در این پژوهش، از ۱۰۰ درصد مصالح RAP استفاده شده و مصالح سنگی جدیدی اضافه نشده است. مصالح RAP مورد استفاده در این پژوهش، از دپوی شهرداری منطقه ۲ تهران تهیه گردید. مصالح سنگی استخراج شده، با توجه به ترکیبات شیمیایی آن (جدول ۱)، از نوع سنگدانه‌های سیلیسی می‌باشد. تعیین درصد قیر مطابق AASHTO T164 و بازیابی قیر استخراج شده از مصالح RAP به روش AASHTO T170 انجام شد. دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس AASHTO T30 تعیین شد.

سیمان مورد استفاده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ است که دارای کاربرد اجرایی گسترده بوده و در پژوهش‌های زیادی از این نوع سیمان استفاده می‌شود. سیمان به‌عنوان یک افزودنی متداول در بازیافت سرد امولسیون، جهت مقایسه با افزودنی‌های مورد مطالعه، به‌کار رفت.

همانطور که ملاحظه می‌شود، بررسی نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مطالعه جامعی روی ویژگی‌های مکانیکی آسفالت بازیافتی امولسیون حاوی گرد کوره سیمان و سرباره فولاد در زمان‌های مختلف عمل‌آوری و دماهای مختلف صورت نگرفته است. سرباره فولاد به دلیل داشتن سیلیس و آلومین زیاد و خاصیت پوزولانی، به عنوان افزودنی ضایعاتی به همراه CKD که می‌تواند به عنوان فعال‌کننده آن عمل کند، ممکن است باعث بهبود عملکرد مخلوط بازیافتی شود. در پژوهش حاضر، خصوصیات مکانیکی مخلوط بازیافتی امولسیون حاوی این دو افزودنی آزمایش و تحلیل شدند.

۳. مشخصات مصالح

مواد و مصالح مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: مصالح خرده آسفالتی، قیر، گرد کوره سیمان و سرباره فولاد به عنوان دو افزودنی اصلی و سیمان به عنوان

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی RAP پس از استخراج قیر

ترکیبات شیمیایی	مقدار (%)
SiO ₂	۵۴/۸۶
Al ₂ O ₃	۷/۲۵
Fe ₂ O ₃	۲/۴۰
CaO	۱۶/۵۴
Na ₂ O	۱/۳۹
K ₂ O	۲/۰۳
MgO	۱/۷۱
سایر	۱۳/۸۲
SiO ₂	۵۴/۸۶

در جدول ۲ آورده شده است. مقدار قیر موجود در مصالح RAP برابر ۴/۲ درصد تعیین شد. با توجه به این که نوع مصالح سنگی سیلیسی است، قیر امولسیون مورد استفاده

دانه‌بندی RAP پیش از استخراج قیر، حدود دانه-بندی RAP طبق مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت و دانه‌بندی مصالح سنگی پس از استخراج قیر

استفاده، از شرکت سیمان فراز فیروزکوه واقع در کیلومتر پنج جاده فیروزکوه- تهران تهیه شده است. مشخصات و ترکیبات شیمیایی سیمان و CKD مورد استفاده که به روش XRF به دست آمده، در جدول ۳ نشان داده شده است. تفاوت اصلی بین سیمان و CKD، مقدار CaO ، SiO_2 و مخصوصاً میزان LOI می باشد.

در این تحقیق از نوع قیر امولسیون دیرشکن کاتیونی (CSS-1) بود که از شرکت کندوان پارس تهران تهیه گردید.

CKD مورد استفاده در این پژوهش، حاصل از گازهای خروجی سیستم پخت سیمان می باشد که روی بگ هاوس^۱ جمع آوری می گردد. سیمان و CKD مورد

جدول ۲. دانه بندی RAP و مصالح سنگی پس از استخراج قیر

اندازه الک (mm)	RAP	حدود RAP	مصالح سنگی پس از استخراج قیر
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۹۴	۹۰-۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۸۰	-	۹۸
۹/۵	۳۶	۲۰-۵۵	۸۰
۴/۷۵	۶	۰-۱۰	۶۳
۲/۳۶	۳	۰-۵	۳۸
۰/۳	۲/۱	-	۱۰
۰/۰۷۵	۱/۱	۰-۲	۴/۷

جدول ۳. خصوصیات و ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی و CKD

ترکیبات شیمیایی	سیمان (%)	CKD (%)
CaO	۶۱/۷۱	۴۲/۸۹
SiO ₂	۲۱/۰۴	۱۵/۲۶
Al ₂ O ₃	۴/۷۵	۳/۶۳
Fe ₂ O ₃	۳/۶۱	۱/۸۵
MgO	۱/۱۹	۰/۸۶
SO ₃	۲/۳۵	۱۰/۱۵۲
K ₂ O	۰/۶۱	۱/۰۵
Na ₂ O	۰/۵۴	۰/۱۸
TiO ₂	-	۰/۱۴۲
MnO	-	۰/۰۷۸
P ₂ O ₅	-	۰/۰۹۲
LOI	۱/۷۳	۲۳/۵۸
سایر	۲/۴۷	-
سایر مشخصات		
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۱۷	۲/۷۱
Blaine No. (m ² /kg)	۳۱۸	۷۹۰

^۱- Baghouse

سرباره مورد استفاده در این پژوهش، که از نوع سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF)^۱ یا فرایند کانورتر اکسیژنی^۲ است، از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان تهیه شد. مشخصات سرباره به شرح جدول ۴ است.

جدول ۴. مشخصات سرباره فولاد

ترکیبات	درصد وزنی
TiO ₂	۳/۳۴
FeO	۰/۶۸
SiO ₂	۳۵/۱۴
CaO	۳۶/۲۲
MgO	۱۰/۴۸
Al ₂ O ₃	۹/۳۶
MnO	۰/۹۸
S	۱/۳۲

با توجه به موارد گفته شده، مخلوط‌های مورد آزمایش در این پژوهش عبارتند از:
 ۱- مخلوط بازیافتی امولسیون بدون افزودنی (مخلوط کنترلی).

۲- مخلوط بازیافتی امولسیون حاوی افزودنی سیمان (به عنوان یک افزودنی متداول جهت مقایسه) به میزان ۱٪ وزن مخلوط آسفالتی.

۳- مخلوط بازیافتی امولسیون حاوی افزودنی سیمان (به عنوان یک افزودنی متداول جهت مقایسه) به میزان ۲٪ وزن مخلوط آسفالتی.

۴- مخلوط بازیافتی امولسیون حاوی CKD به میزان ۶٪ وزن مخلوط آسفالتی.

۵- مخلوط بازیافتی امولسیون حاوی ترکیب CKD به میزان ۳٪ و سرباره فولاد به میزان ۳٪ وزن مخلوط آسفالتی.

در طرح اختلاط آزمایشگاهی، RAP در ۴۰ درجه سلسیوس خشک و مقدار مورد نیاز آب (تا رسیدن به رطوبت بهینه) به RAP خشک اضافه شد. pH آب مورد استفاده در این پژوهش ۸ بود.

۴. طرح اختلاط آزمایشگاهی

در این پژوهش، از روش طرح اختلاط مارشال اصلاح شده (AASHTO، ۱۹۹۸) به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها در پژوهش‌هایی که اخیراً انجام شده، استفاده شد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۲). با انجام پیش‌آزمایش‌هایی نظیر استقامت مارشال و مقاومت کششی و با در نظر گرفتن مواردی نظیر پوشش مناسب قیر و کارایی مخلوط در هنگام ساخت، مقادیر CKD و سرباره فولاد در مخلوط بازیافتی، تعیین گردید.

²- Oxygen converter process

¹- Basic oxygen furnace steel slag

افزودنی‌های مختلف در درصد قیر بهینه مشخص شد. این مقدار برای مخلوط بدون افزودنی ۳/۵٪ به دست آمد. نتایج طرح اختلاط شش نوع مخلوط مورد آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقدار رطوبت بهینه در نمونه‌های دارای افزودنی به دلیل کاهش کارایی مخلوط، افزایش یافت.

۵. برنامه آزمایشگاهی

در انجام آزمایش‌ها، جهت کند کردن گیرش قیر امولسیون، عمل‌آوری محیطی^۲ انجام شد. بر اساس مطالعات گذشته، مدت زمان و دمای عمل‌آوری مهمترین متغیرهای تأثیرگذار بر خواص نهایی مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی هستند (لیو و همکاران، ۲۰۲۲؛ مقدم و ملاشاهی، ۲۰۱۷).

نمونه‌ها پس از خروج از قالب، با کیسه پلاستیکی پوشانده شده و به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در دمای محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. سپس، جهت انجام آزمایش در دماهای مربوطه، به مدت ۱۲ ساعت قبل از آزمایش در محفظه کنترل دما^۳ قرار داده شدند. نحوه نگهداری نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

آزمایش‌های مکانیکی شامل آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، مدول برجهنگی و خستگی است. این آزمایش‌ها در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی انجام شده است. برای هر دمای آزمایش و زمان عمل‌آوری، سه نمونه ساخته و میانگین مقادیر به عنوان نتایج حاصل از آزمایش گزارش شد.

۶- مخلوط بازیافتی امولسیونی حاوی سرباره فولاد به میزان ۶٪ وزن مخلوط آسفالتی.

جهت تعیین قیر امولسیون بهینه با استفاده از روش مارشال اصلاح‌شده، مصالح RAP با مقادیر مختلفی از قیر امولسیون مخلوط شد. در مرحله تعیین درصد قیر امولسیون بهینه، درصد رطوبت کل موجود در مخلوط‌های مختلف (آب موجود در قیر امولسیون، رطوبت موجود در مصالح RAP و آب اضافه شده به مخلوط) برابر با ۳٪ می‌باشد (AASHTO، ۱۹۹۸). قیر باقیمانده^۱ با مقادیر مختلف، بین ۰/۵ تا ۲/۵ درصد با فواصل ۰/۵ درصد، به مخلوط بدون افزودنی اضافه شد. پس از افزودن قیر امولسیون و آب اضافی به مصالح RAP، عملیات اختلاط تا دستیابی به یکنواختی کامل ادامه یافت. سپس نمونه‌ها با استفاده از متراکم‌کننده مارشال با اعمال ۵۰ ضربه به هر طرف آنها متراکم شدند. پس از این مرحله، نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس درون گرمخانه عمل‌آوری شده و قبل از خروج نمونه‌ها از قالب، ۱۲ ساعت عمل‌آوری در دمای آزمایشگاه ادامه یافت. پس از خروج نمونه‌ها از درون قالب، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری و وزن مخصوص حقیقی و حداکثر آنها به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D2726 و D2041 تعیین شد. سپس فضای خالی نمونه‌ها محاسبه شد. تنها معیار ارائه شده در روش طرح اختلاط مارشال اصلاح‌شده شامل فضای خالی بین ۹ تا ۱۴ درصد می‌باشد (مارتینز اچوریا و همکاران، ۲۰۱۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۲). با استفاده از این معیار و با در نظر گرفتن حداکثر استقامت مارشال و حداکثر وزن مخصوص حقیقی، قیر باقیمانده برای مخلوط بدون افزودنی ۲٪ به دست آمد. این مقدار برای تمام مخلوط‌ها ثابت فرض شد. در گام بعدی، مقدار رطوبت بهینه برای همه مخلوط‌های با

3- Temperature Control Chamber

1- Remained Bitumen

2- Ambient Curing

جدول ۵. نتایج طرح اختلاط مخلوط‌های مورد آزمایش در درصد قیر بهینه

SL6	CK3SL3	CK6	C2	C1	NA	نام اختصاری مخلوط
slag /۶	slag /۳ CKD /۳	CKD /۶	سیمان /۲	سیمان /۱	بدون افزودنی	نوع افزودنی‌ها
۲/۰۷۳	۲/۱۲۸	۲/۱۴۵	۲/۱۱۲	۲/۰۷۰	۲/۰۴۱	وزن مخصوص حقیقی (gr/cm ³)
۲/۳۹۰	۲/۳۸۵	۲/۴۱۲	۲/۴۰۵	۲/۳۹۶	۲/۳۷۹	وزن مخصوص حداکثر (gr/cm ³)
۱۰/۰۵	۱۰/۲۸	۱۱/۲۶	۱۰/۵۴	۸/۹۹	۷/۹۱	استقامت مارشال (kN)
۱۴/۲	۱۴/۹	۱۳/۲	۱۴/۳	۱۳/۶	۱۳/۸	فضای خالی (%)
۴/۸	۴/۳	۴/۷	۴/۷	۴/۵	۳/۵	میزان رطوبت بهینه (%)



شکل ۱. نمونه‌های قرار داده شده در کیسه‌های پلاستیکی

$$S_T = \frac{2P_{ult}}{\pi t D} \quad (1)$$

که S_T مقاومت کششی (N/mm^2)، P_{ult} بار نهایی که منجر به شکست نمونه می‌گردد (N)، t ضخامت نمونه (mm) و D قطر نمونه (mm) است.

۳-۵. آزمایش حساسیت رطوبتی

حساسیت رطوبتی یکی از ویژگی‌هایی است که به طور مستقیم به عملکرد و دوام مخلوط آسفالتی در طول دوره بهره‌برداری مربوط می‌شود (کراس، ۱۹۹۹). جهت جلوگیری از خرابی رطوبتی، قابلیت مقاومت این نوع مخلوط‌ها در برابر رطوبت باید مورد ارزیابی قرار گیرد (دو، ۲۰۱۵؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۲). آزمایش لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283) یکی از دقیق‌ترین آزمایش‌هایی است که برای پیش‌بینی آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در دسترس می‌باشد (ویلیامز و

۵-۱. آزمایش استقامت مارشال

در این پژوهش، آزمایش استقامت مارشال جهت انجام طرح اختلاط و به دست آوردن میزان قیر بهینه انجام شد. همچنین، جهت مقایسه پارامترهای مارشال در مخلوط‌های مختلف، مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 برای ترکیب‌های مختلف در دمای $60^\circ C$ و با نرخ بارگذاری 50 mm/min انجام شد. نمونه‌های این آزمایش با توجه به نتایج به دست آمده از طرح اختلاط برای هر کدام از افزودنی‌های مورد استفاده ساخته شدند.

۵-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد ASTM D6931 انجام شد. مقاومت کششی نمونه‌ها در لحظه شکست، مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری مدول برجهندگی، دستگاه^۱ (UTM-14P) استفاده شد. مدول برجهندگی نمونه‌ها بر اساس روش استاندارد ASTM D7369 تعیین گردید. برای یک بار دینامیک با حداکثر اندازه P که تغییرشکل‌های افقی ناشی از آن اندازه‌گیری شده‌اند، مدول برجهندگی با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$M_r = \frac{P(\mu+0.27)}{t\delta_h} \quad (3)$$

که، M_r مدول برجهندگی (MPa)، P حداکثر اندازه بار دینامیک (N)، μ ضریب پواسون، t طول نمونه (mm) و δ_h تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر کل (mm) است.

در رابطه (۳)، ضریب پواسون وابسته به دماست و از رابطه (۴) به دست می‌آید (ویتزک و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\mu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(3.1849 - 0.04233t)}} \quad (4)$$

۵-۵. آزمایش خستگی

آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم به عنوان یک روش مناسب برای بررسی خواص خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شده است (زنکوویچ و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش، آزمایش خستگی به روش کنترل تنش روی نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد EN 12697-24 (۲۰۰۴) انجام شده است. همانند آزمایش مدول برجهندگی، جهت انجام این آزمایش از دستگاه UTM-14P استفاده شد. پس از اتمام فرایند هم‌دمایی، آزمایش خستگی برای هر گروه با تنش‌های بارگذاری مربوطه (سه سطح تنش و دو تکرار به ازای هر سطح تنش) انجام شد. عمر خستگی، برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری پیش از شکست نمونه می‌باشد (کاوسی و مدرس، ۲۰۱۰b). در این روش، در صورتی که مقدار ضریب پواسون (μ) برابر با ۰/۳۵ فرض گردد، مقدار کرنش حداکثر در مرکز نمونه، با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید.

بریکاه، ۲۰۱۰). نسبت مقاومت کششی TSR طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$TSR = \frac{ITS_{con}}{ITS_{suncon}} \quad (2)$$

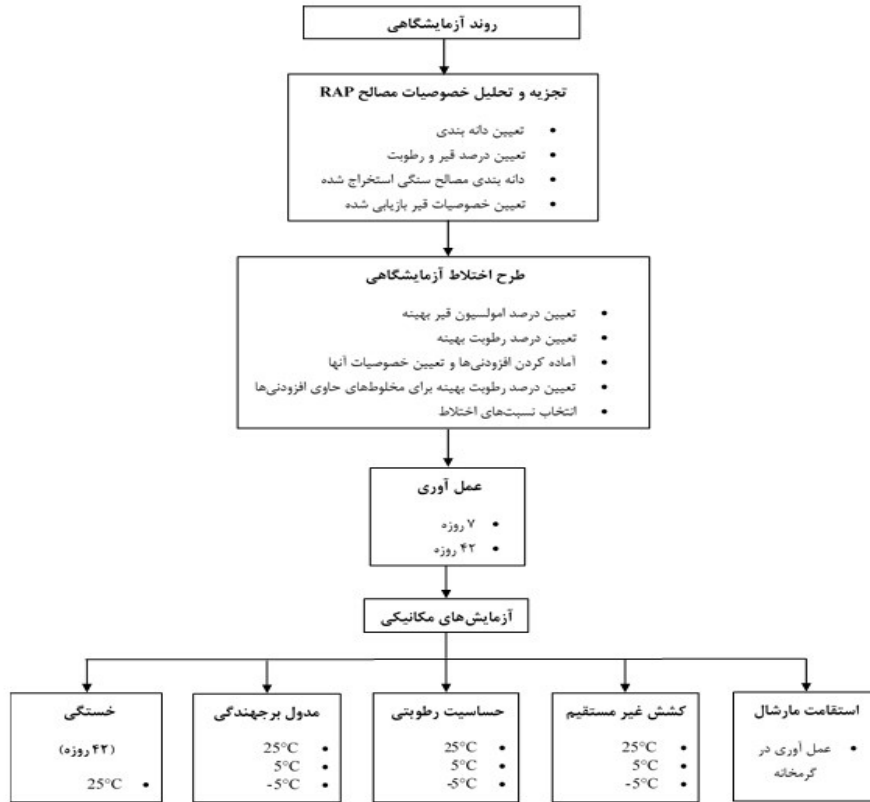
که در آن ITS_{con} میانگین مقاومت کششی نمونه‌های اشباع بر حسب kN/m^2 و ITS_{suncon} میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک بر حسب kN/m^2 می‌باشد. از شاخص TSR برای پیش‌بینی حساسیت در برابر عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. مقدار حداقل TSR برای مخلوط آسفالتی گرم ۰/۸ است. اما تا کنون حداقل مقدار استاندارد TSR برای مخلوط بازیافتی امولسیونی تعیین نشده است (کراس، ۱۹۹۹). با این حال، برخی از دستورالعمل‌ها، حداقل مقدار ۰/۶ را به عنوان معیار طراحی برای مخلوط بازیافتی امولسیونی تعیین کرده‌اند (مدرس و عیار، ۲۰۱۴).

۵-۴. آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی به عنوان یکی از داده‌های ورودی اصلی در تئوری چندلایه‌ای در طراحی روسازی‌های انعطاف پذیر حائز اهمیت است. مقدار مدول برجهندگی بزرگتر بدان معناست که می‌توان انتظار داشت ماده مقاومت بهتری نسبت به تغییرشکل دائمی داشته باشد (سیزکوا و سودا، ۲۰۱۷). به دلیل تکامل شکست قیر امولسیون و خصوصیات مقاومتی پیش‌رونده در مخلوط‌های بازیافت شده با قیر امولسیون و افزودنی‌های هیدرولیکی و پوزولانی، مدول برجهندگی آنها تغییر کرده و با گذشت زمان افزایش می‌یابد. بنابراین، انتخاب مدول برجهندگی این مخلوط‌ها در طراحی، پیچیده‌تر از مخلوط‌های آسفالت گرم است (کاوسی و مدرس، ۲۰۱۰a؛ میلر و همکاران، ۲۰۱۷). از این‌رو، برای کنترل ظرفیت تحمل بار، اندازه‌گیری مدول برجهندگی نمونه‌های بازیافتی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری ضروری است.

¹- Universal Testing Machine

(mm) است. $\epsilon_0 = 2.1 \frac{\Delta H}{D}$ (۵)
 فلوچارت برنامه آزمایشگاهی پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است.
 که در آن، D قطر نمونه (mm)، ϵ_0 : کرنش کششی در مرکز نمونه (میکرواسترین) و ΔH تغییر شکل افقی



شکل ۲. فلوچارت برنامه آزمایشگاهی پژوهش

۶. نتایج و بحث

۶-۱. استقامت مارشال

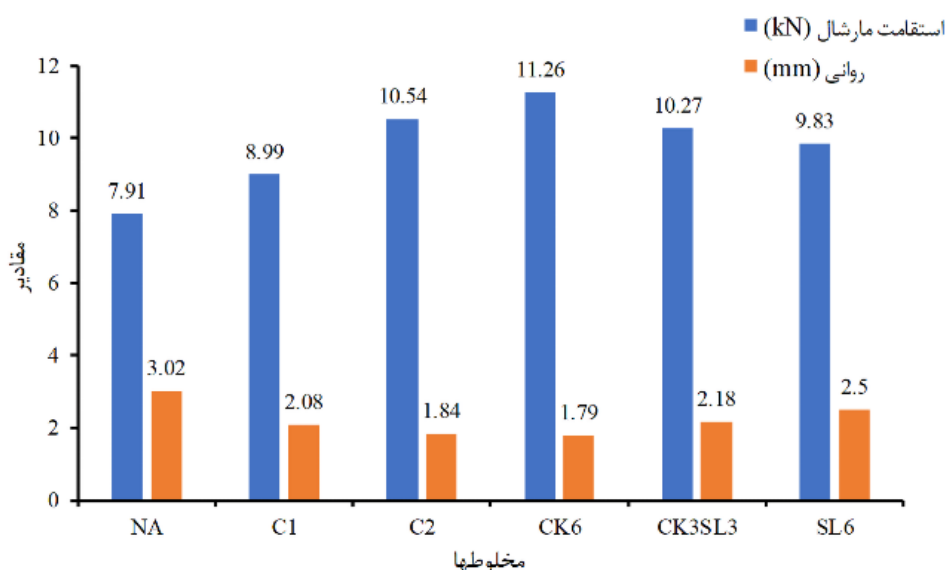
مخلوط‌های حاوی CKD می‌شوند. همچنین، با استفاده از CKD، دانه‌بندی و وزن مخصوص مخلوط بهبود یافت و مخلوط توپرتر شد. از طرفی، به دلیل ریزدانه بودن و سطح مخصوص بالای CKD و با توجه به این که رطوبت بهینه برای مخلوط‌های حاوی افزودنی یکسان لحاظ شد، میزان روانی در مخلوط کاهش یافت. در مخلوط حاوی سرباره فولاد (SL6)، مقاومت نسبت به مخلوط بدون افزودنی و حتی نسبت به مخلوط حاوی ۱٪ سیمان بهبود قابل توجهی داشت. ناصر و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان دادند که در صورت جایگزینی درصد مشخصی از فیلر با سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی

نتایج آزمایش مارشال تحت شرایط عمل‌آوری در گرمخانه، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، از میان مخلوط‌ها، CK6 بیشترین استقامت مارشال را دارا بود. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده شد، CKD دارای مقدار زیادی آهک آزاد (CaO) و نیز سولفات می‌باشد، که در تشکیل C-S-H (از طریق واکنش پوزولانی) و اترینگایت^۱ شرکت می‌کنند. هر دوی این محصولات باعث افزایش مقاومت

¹ Ettringite

CK3SL3. آب سطح مشترک را مصرف می‌کنند و مقاومت چسبندگی بین ماستیک قیری جدید و ماستیک قیری فرسوده را افزایش می‌دهند. همانطور که انتظار می‌رفت، مخلوط با ۲٪ سیمان (C2) دارای استقامت بالایی بود، که با مطالعات سایر پژوهشگران تطابق داشت (مدرس و عیار، ۲۰۱۶؛ صدیق، ۲۰۰۶).

بازیافتی ساخته شده با RAP، استقامت مخلوط به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در CK3SL3، با جایگزین کردن ۳٪ سرباره فولاد با ۳٪ از CKD نسبت به مخلوط ۶٪ CKD، استقامت مارشال کاهش و روانی افزایش یافت. این افزایش کارایی در هنگام ساخت مخلوط نیز مشهود بود. در واقع، محصولات هیدراتاسیون ایجاد شده در اثر واکنش CKD و سرباره فولاد در میکروساختار



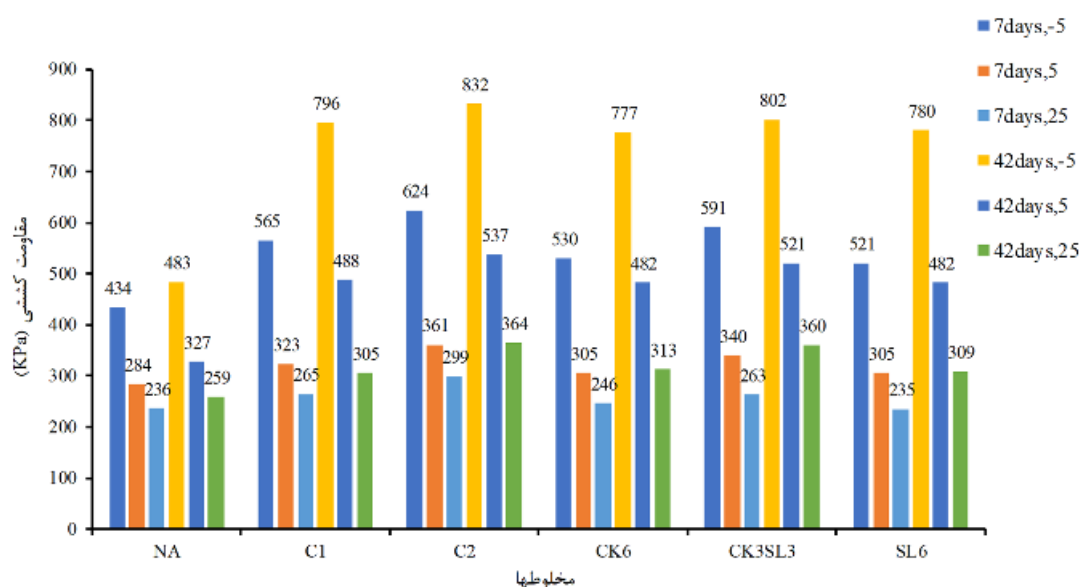
شکل ۳. نتایج آزمایش استقامت مارشال

واکنش‌های پوزولانی باعث افزایش سفتی و چسبندگی ماستیک قیری جدید می‌شوند. به علاوه، محصولات حاصل از هیدراتاسیون می‌توانند مقاومت چسبندگی سطح مشترک بین ماستیک قیری و RAP را افزایش دهند (دو، ۲۰۱۵). همچنین، با کاهش دما، مقاومت کششی مخلوطها افزایش یافت. در مقایسه بین اثر دما و اثر عمل آوری، تأثیر کاهش دما در افزایش مقاومت کششی مشهودتر بود، که با نتایج تحقیق کاووسی و مدرس (۲۰۱۰b) مطابقت داشت. مقاومت بیشتر CK6 نسبت به مخلوط NA به دلیل تشکیل هیدروکسید کلسیم و اترینگایت می‌باشد. تشکیل اترینگایت، مقاومت کوتاه-مدت را بهبود می‌بخشد، در حالی که هیدروکسید کلسیم،

۲-۶. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)
 نتایج مقادیر میانگین ITS در دماهای ۲۵، ۵ و -۵ درجه و با عمرهای ۷ و ۴۲ روزه در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش زمان عمل آوری، مقاومت کششی مخلوطها افزایش یافت. در این میان، مخلوط بدون افزودنی (NA) به دلیل عدم وقوع واکنش پوزولانی، کمترین افزایش را در مقاومت کششی داشت. در این مخلوط، تا زمانی که فرآیند شکسته شدن قیر امولسیون ادامه دارد، مقاومت کششی مخلوط نیز افزایش می‌یابد. استفاده از همه افزودنی‌های پوزولانی مورد بررسی، در ECRM باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط، مخصوصاً در عمر ۴۲ روزه، شد. زیرا با وجود رطوبت بهینه، محصولات حاصل از هیدراتاسیون و

کلسیم آلومینات هیدرات (C-A-H) و کلسیم آلومینوسیلیکات هیدرات (C-A-S-H) می دهد، که می تواند چسبندگی سطح قیر- مصالح سنگی را بهبود بخشد. در نتیجه، مقاومت کششی افزایش می یابد. تحقیقات گذشته نیز نشان داده، در صورتی که CKD با افزودنی ضایعاتی پوزولانی به طور مناسبی ترکیب شود، ترکیبات آکالی CKD می تواند افزودنی پوزولانی را فعال کرده و این ترکیب ایجاد مصالح سیمانی کند (صدیق، ۲۰۰۶).

تشکیل C-S-H را در طول واکنش پوزولانی سبب می شود. در همه دماها و سنین، دو مخلوط C2 و CK3SL3 دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به سایر مخلوطها بودند. همان طور که از جداول ۳ و ۴ مشاهده می شود، CKD حاوی مقدار قابل توجهی CaO و مقداری SiO₂ است. از طرف دیگر، سرباره فولاد دارای مقدار نسبتاً زیادی SiO₂ و Al₂O₃ می باشد. استفاده همزمان از این دو نوع افزودنی سبب ایجاد واکنش پوزولانی بین کلسیم موجود در CKD و سیلیکا و آلومینای موجود در سرباره فولاد شده و تشکیل کلسیم هیدروسیلیکات (C-S-H)،



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

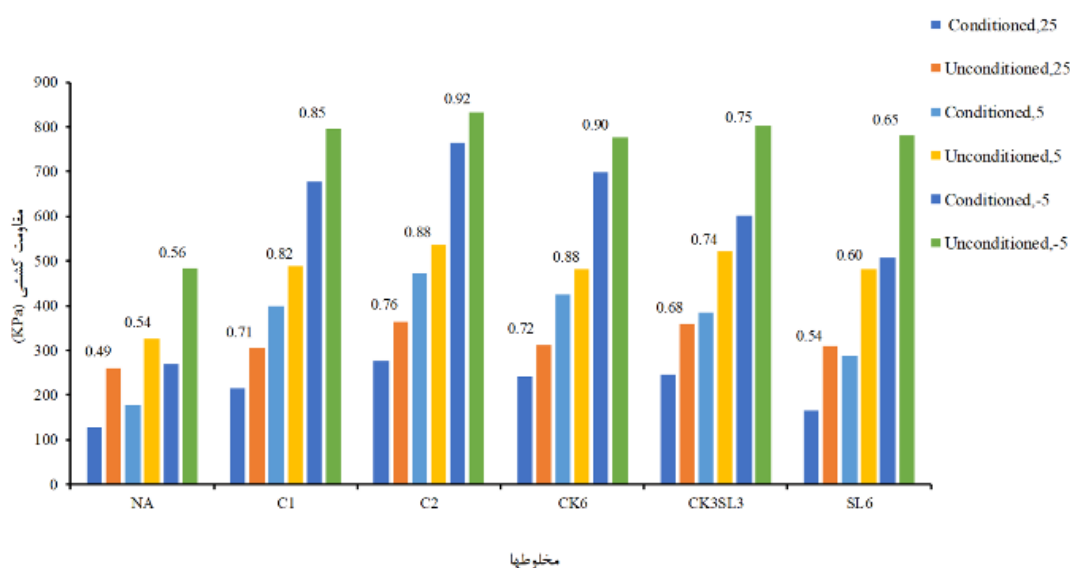
خشک و اشباع افزایش یافت. با این حال، با کاهش دما، TSR افزایش یافت. این مورد می تواند ناشی از افزایش قابل توجه سختی فاز قیری در دمای کم باشد، که باعث کاهش تفاوت مقاومت کششی در دو حالت خشک و اشباع شد. همانطور که انتظار می رفت، NA، TSR کمی داشته که بیانگر حساسیت رطوبتی زیاد آن می باشد. افزودن ۶ درصد سرباره فولاد به مخلوط، باعث افزایش مقاومت در برابر رطوبت شد. اگرچه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، حداقل معیار طراحی مخلوطهای بازیافتی

۳-۶. حساسیت رطوبتی

آزمایش حساسیت رطوبتی در شرایط محیطی، در سه دمای ۲۵، ۵ و -۵ درجه سلسیوس و با عمر ۴۲ روزه انجام شد. بنابراین، علاوه بر تأثیر افزودنی های پوزولانی، اثرات دما بر حساسیت مخلوطهای بازیافتی امولسیون نیز بررسی شد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی در شکل ۵ نشان داده شده است. با کاهش دما، مقاومت کششی مخلوطها به دلیل افزایش سختی، در هر دو شرایط

در CK6، با افزایش مقدار CKD و به تبع آن مقدار آهک، مقاومت در برابر رطوبت افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته، به طوری که با C1 برابری کرد. در میان مخلوط‌های مورد بررسی، مخلوط دارای ۲٪ سیمان (C2) بیشترین مقاومت را در برابر خرابی‌های رطوبتی از خود نشان داد، که می‌تواند به دلیل نقش آب در فرایند هیدراتاسیون سیمان باشد. در واقع، محصولات هیدراتاسیون، رطوبت موجود در مخلوط را مصرف کرده و مقاومت چسبندگی بین ماستیک قیری جدید و ماستیک قیری کهنه را افزایش می‌دهند (دو، ۲۰۱۵). البته شاید استفاده از ۲٪ سیمان با توجه به افزایش اندک TSR نسبت به مخلوط دارای ۱٪ سیمان، اقتصادی نباشد.

امولسیون (TSR=0.6) که توسط برخی از دستورات عملی (کراس، ۱۹۹۹) ارائه شده است، را برآورده نکرد. با توجه به مقدار زیاد آهک در CKD و بهبود خواص ضدعریان‌شدگی، در مخلوط CK3SL3 مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی افزایش یافته و معیار مربوطه برآورده شد. افزودن CKD به سرباره فولاد، ماده-ای شبه‌سیمانی ایجاد می‌کند. همچنین، افزایش TSR در مخلوط حاوی سرباره فولاد همراه با CKD با توجه به پیشرفت واکنش هیدراتاسیون و افزایش چسبندگی قیر و باعث توجه است. زیرا وجود رطوبت می‌تواند باعث پیشرفت واکنش پوزولانی در مصالح با خواص سیمانی شده و باعث افزایش مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی گردد (براون و نیدهام، ۲۰۰۰).



شکل ۵. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی (اعداد، نمایانگر TSR هستند)

باعث افزایش M_R مخلوط، مخصوصاً در عمر ۴۲ روزه، شد.

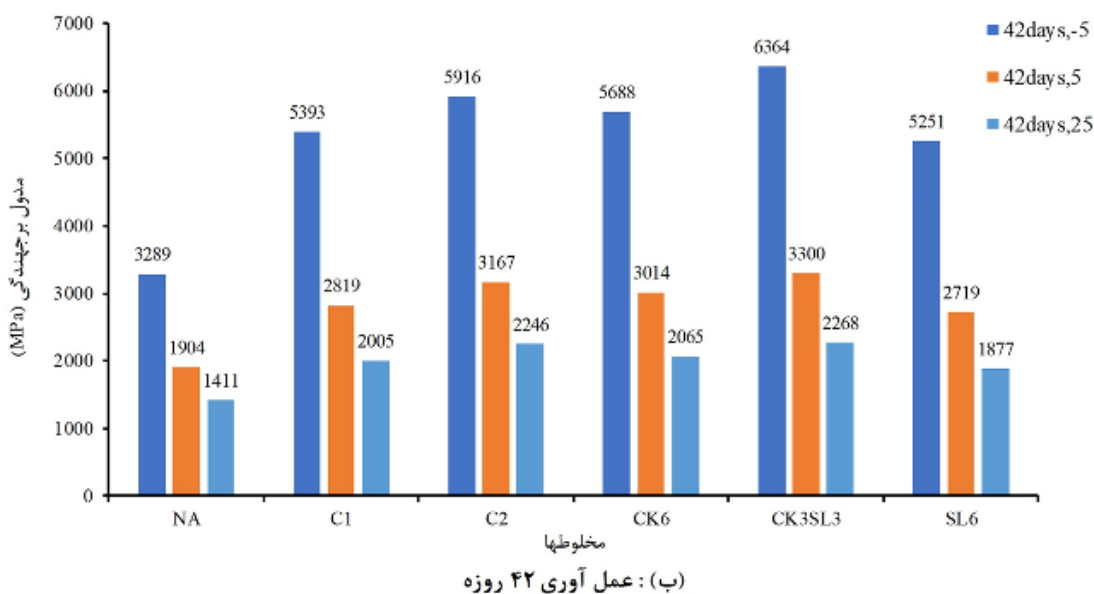
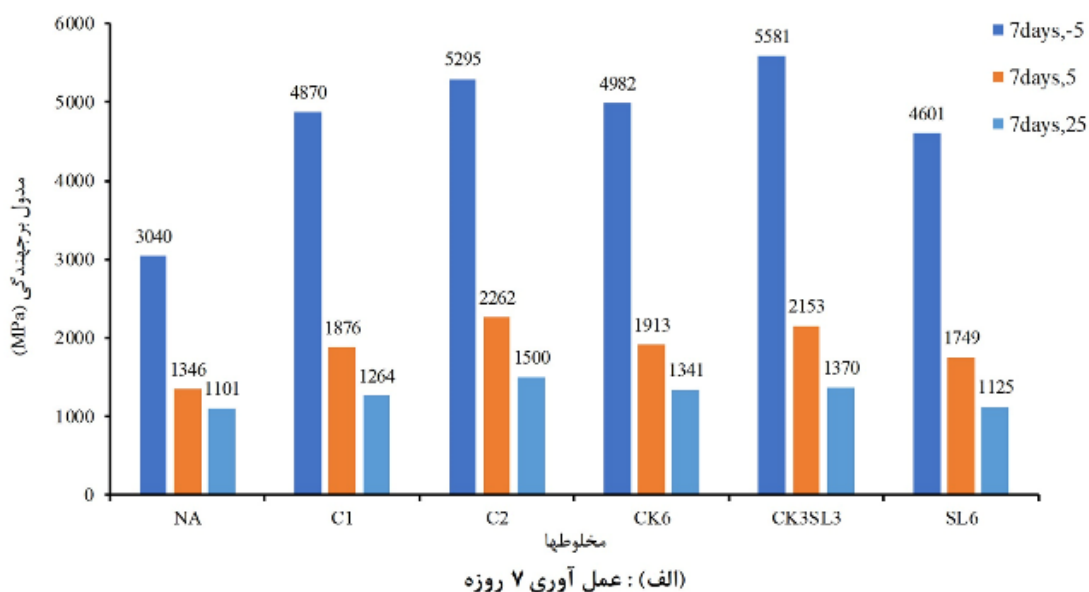
مقایسه شکل‌های ۶ (الف) و ۶ (ب) نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز به ۴۲ روزه، مدول برجهنگی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد؛ زیرا گذشت زمان،

۴-۶. مدول برجهنگی (M_R)

میانگین M_R در دماهای ۲۵، ۵ و -۵ درجه سلسیوس برای نمونه‌های ۷ و ۴۲ روزه در شکل ۶ نشان داده شده است. از نتایج کاملاً پیداست که استفاده از همه افزودنی‌های پوزولانی مورد بررسی در مخلوط بازیافتی امولسیونی

شد، که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (مدرس و عیار، ۲۰۱۶؛ براون و نیدهام، ۲۰۰۰). سفتی بیشتر مخلوط CK3SL3 نسبت به مخلوط C1 می‌تواند به علت ریزدانه بودن CKD و سطح مخصوص زیاد آن، مقدار آهک آزاد بیشتر، سولفات و سایر عناصر واکنشی مانند سیلیس و آلومینا در این مخلوط باشد (جداول ۳ و ۴).

افزایش هیدراتاسیون و افزایش واکنش‌های پوزولانی باعث افزایش سفتی مخلوط می‌شود. در این میان، مخلوط بدون افزودنی (NA)، کمترین افزایش در M_r را دارا بود. در همه دماها و عمرها، دو مخلوط C2 و CK3SL3، M_r بزرگتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشتند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش سیمان در مخلوط C2 باعث افزایش M_r آن نسبت به مخلوط C1



شکل ۶. اثر افزودنی‌های مختلف و مدت زمان عمل‌آوری بر مخلوط‌های بازآفرینی مورد آزمایش

بهبتر روند تغییرات، اثرات دما با نمودار نمایی برآزش شد. نتایج نشان می‌دهد که برای تمامی مخلوط‌ها، مقادیر مدول برجهندگی به‌طور مداوم با کاهش دما، افزایش می‌یابد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، بجز نمونه بدون افزودنی (NA)، ضرایب همبستگی در سایر نمودارها بیش از ۰/۸ بود. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر دما بر مدول برجهندگی در مقایسه با مدت زمان عمل‌آوری، بیشتر است. این نتایج مطابق با نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققان (مقدم و ملاشاهی، ۲۰۱۷؛ کاووسی و مدرس، ۲۰۱۰a) بود.

۵-۶. عمر خستگی

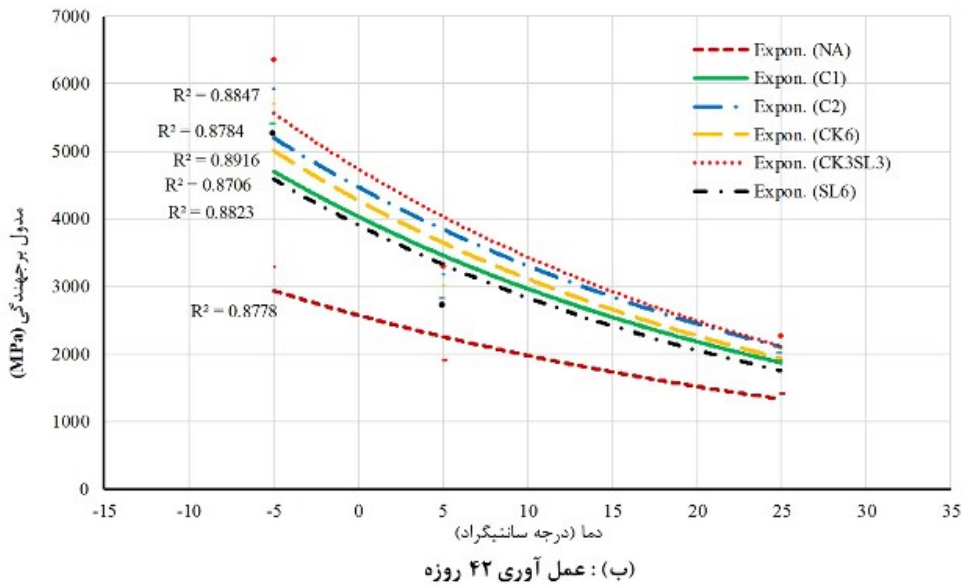
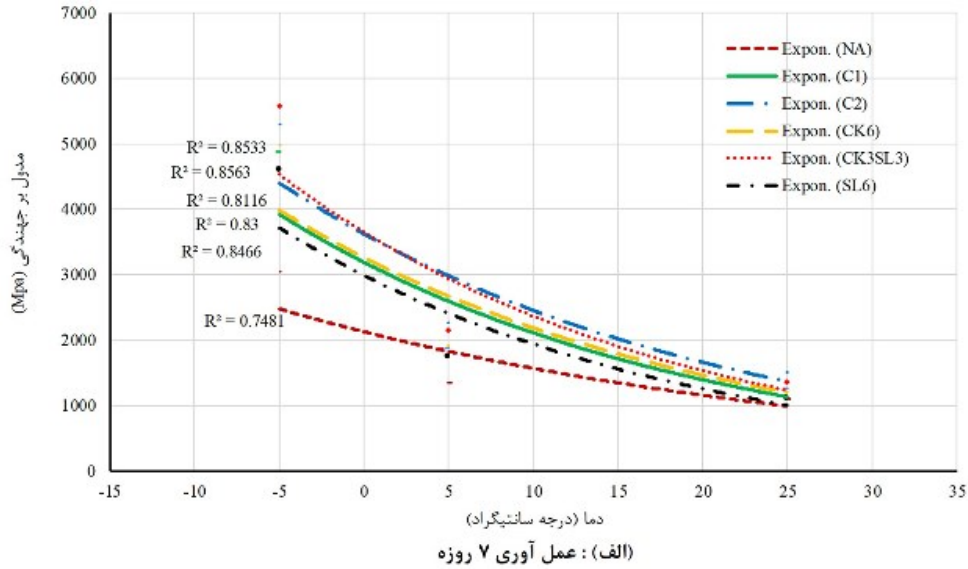
در شکل ۸، نمودارهای خستگی به‌دست آمده برای مخلوط‌های مختلف در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال افزودنی‌ها، شیب نمودارهای خستگی کاهش یافته است. کاهش شیب نمودارهای خستگی با اضافه کردن افزودنی‌های پوزولانی، نشانه تغییر ویژگی‌های یک مخلوط آسفالتی به یک مصالح شبه‌سیمانی است. مطابق شکل ۸، اگرچه تمامی نمودارها در یک نقطه متقاطع نشده‌اند، اما محدوده‌هایی از کرنش‌ها را می‌توان به‌عنوان محدوده کرنش مرزی تعیین نمود.

صرف‌نظر از نمودار خستگی نمونه فاقد افزودنی (NA)، سایر نمودارها در حدود کرنش اولیه ۳۵۰ میکرواسترین متقاطع می‌باشند. در کرنش‌های اولیه کمتر از این مقادیر، مخلوط‌های سفت‌تر و پوزولانی‌تر دارای عمر خستگی بیشتری هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مخلوط حاوی ۲٪ سیمان در کرنش‌های کمتر از محدوده کرنش مرزی، دارای بیشترین عمر خستگی است و با کاهش مقدار کرنش، عمر خستگی در این مخلوط‌ها افزایش می‌یابد.

مقدار بیشتر M_r در مخلوط CK3SL3 نسبت به مخلوط‌های CK6 و SL6 نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فولاد در مخلوط بازیافتی امولسیونی به‌عنوان مکمل برای CKD، یک ماده شبه‌سیمانی را ایجاد کرد که باعث افزایش مدول برجهندگی در این مخلوط نسبت به مخلوط‌های حاوی هر یک از این افزودنی‌ها شد. بهبود در نتایج مدول برجهندگی مخلوط حاوی افزودنی ترکیبی جدید به دو دلیل است: اول این که محصولات هیدراتاسیون می‌توانند سفتی چسبنده قیری را افزایش دهند و تفاوت سفتی بین ماستیک قیری جدید و قیر موجود در RAP را کاهش دهند. دوم این که همزمان محصولات هیدراتاسیون، آب سطح مشترک (رطوبت آزاد موجود) را مصرف می‌کنند و باعث افزایش مقاومت چسبندگی بین ماستیک قیری جدید و RAP می‌شوند. بنابراین، مقاومت اتصال بین ماستیک قیری جدید و RAP به وسیله محصولات هیدراتاسیون به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.

در واقع، شبکه کریستالی حاصل از واکنش‌های هیدرولیکی و پوزولانی افزودنی ترکیبی، با چسباندن مصالح سنگی به یکدیگر، باعث کاهش تغییرشکل الاستیک نمونه می‌شود. علاوه بر این، فضاهاى خالی میان مصالح سنگی با محصولات کریستالی پر و این امر منجر به تشکیل یک ساختار متراکم‌تر می‌شود. این مسأله نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل مهم برای افزایش مدول برجهندگی مخلوط باشد. تولید ترکیبات سیمانی ثانویه، همراه با کاهش تخلخل، دلایل اصلی رسیدن به سفتی بالاتر در مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی پوزولانی است.

شکل ۷، اثر تغییرات دما بر مدول برجهندگی انواع مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی را در زمان‌های عمل‌آوری ۷ روز و ۴۲ روز نشان می‌دهد. جهت مشاهده



شکل ۷. اثر دما بر مدول برجهندگی مخلوط‌های بازیافتی مورد آزمایش

این مسأله صحیح است؛ زیرا در سطوح کرنش بالاتر، پوشش همگن قیر^۱ روی دانه‌های RAP باعث انعطاف-پذیری مخلوط می‌شود. در واقع، مخلوط‌های بدون افزودنی، مشخصات ویسکوالاستیک بیشتری دارند؛ در حالی که رفتار مخلوط دارای افزودنی به مصالح نیمه-صلب^۲ نزدیک‌تر است.

شکل ۹، میانگین حداکثر عمر خستگی مخلوط‌های بازیافتی امولسیون را نشان می‌دهد. عمر خستگی کم در

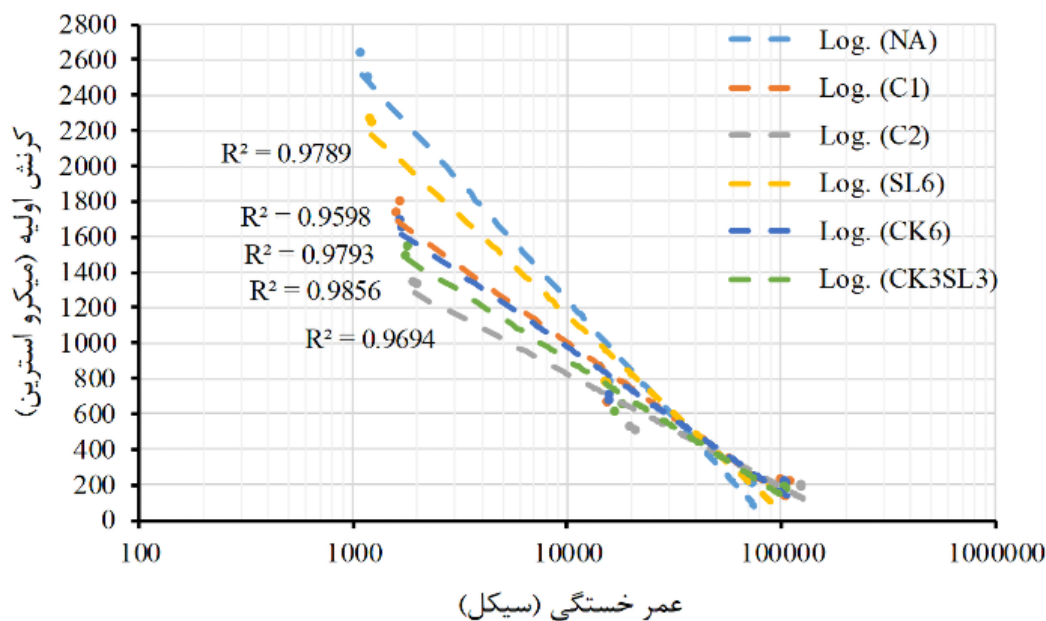
مخلوط حاوی ترکیب CKD و سرباره فولاد (CK3SL3) نیز دارای عمر خستگی کاملاً مناسبی در این سطوح کرنش است. از طرفی، نمودار خستگی این مخلوط، نمودار خستگی مخلوط بدون افزودنی (NA) را در سطح کرنش حدود ۵۰۰ قطع می‌کند. این بدان معناست که کمتر از این مقادیر کرنش، مخلوط CK3SL3 مقاومت خستگی بیشتری نسبت به مخلوط NA دارد و در سطوح کرنش بالاتر از این مقادیر، عکس

² Semi-rigid

¹ Homogeneous Coating

می‌تواند عامل عمر خستگی بیشتر این مخلوط‌ها در کرنش‌های مد نظر باشد. زیرا عمل‌آوری مناسب و انجام واکنش‌های پوزولانی در این مخلوط‌های پوزولانی می‌تواند باعث افزایش میزان قیر مؤثر شده و فضای خالی را در مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی کاهش دهد. در طول فرآیند عمل‌آوری، سطح مشترک و محصولات هیدراتاسیون به تدریج توسط غشای قیر پوشیده می‌شود، که این امر باعث بهبود خواص ویسکوالاستیک و خستگی می‌شود. نتایج حاصل از تحقیقات دولیمی و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد که ترکیب CKD به عنوان یک فعال‌کننده مواد پوزولانی و PSA که همانند سرباره فولاد، پوزولان محسوب می‌شود، بهبود قابل توجهی در عملکرد خستگی مخلوط سرد امولسیونی داشت.

مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی بدون افزودنی عمدتاً به دلیل میزان قیر مؤثر کمتر و تعداد زیاد تخلخل‌های سطح مشترک است (لین و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس نتایج، استفاده از تمامی افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش باعث افزایش عمر خستگی مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی شد. در این میان، مخلوط حاوی ۲٪ سیمان (C2) به طور واضحی نسبت به سایر مخلوط‌ها بیشترین عمر خستگی را دارا بود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب CKD و سرباره فولاد باعث افزایش خوبی در عمر خستگی مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی شده است. تحقیقات نشان داده که مقاومت خستگی، ارتباط نزدیکی با فضای خالی نمونه‌ها دارد (لین و همکاران، ۲۰۱۷). تراکم زیاد بافت مخلوط CK3CW3



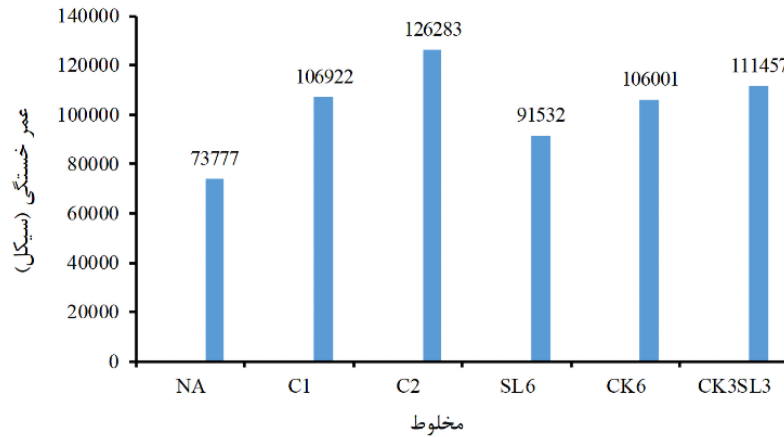
شکل ۸. نمودارهای خستگی مخلوط‌های مورد آزمایش

کرنش اولیه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرواسترین صورت گرفت (شکل ۱۰). در سطوح کرنش اولیه ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرواسترین، مخلوط سفت‌تر حاوی افزودنی جدید (ترکیب CKD و سرباره فولاد)، مقاومت خستگی بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشت. اگرچه در سطح کرنش ۲۰۰

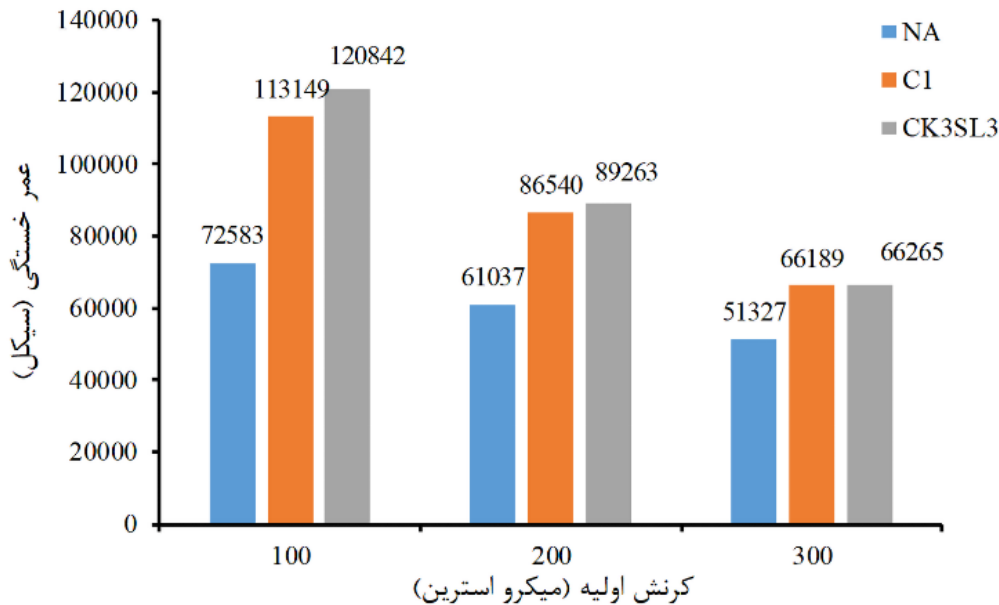
با توجه به آنکه سطح کرنش‌ها در شرایط واقعی در مخلوط‌های بازیافتی امولسیونی که معمولاً به‌عنوان اساس مورد استفاده قرار می‌گیرند در محدوده پایین و کمتر از ۲۰۰ میکرواسترین قرار دارد (براون و نیدهام، ۲۰۰۰؛ کاووسی و همکاران، ۲۰۱۱)، مقایسه‌ای میان عمر خستگی مخلوط‌های NA، C1 و CK3SL3 در سطوح

خستگی این مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. در سطح کرنش ۳۰۰ میکرواسترین، با افزایش سطح کرنش، نسبت عمر خستگی مخلوط NA به سایر مخلوط‌ها افزایش یافت.

میکرواسترین، اختلاف عمر خستگی بین مخلوط CK3SL3 و C1 کمتر بود، اما همچنان مقاومت خستگی نسبت به مخلوط NA به‌وضوح بیشتر بود. پس می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این افزودنی به وضوح عمر



شکل ۹. میانگین حداکثر عمر خستگی مخلوط‌های مختلف مورد آزمایش



شکل ۱۰. مقایسه عمر خستگی مخلوط‌های NA، C1 و CK3SL3 در سطوح کرنش اولیه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرواسترین

افزودنی در بازیافت امولسیون، مقایسه گردید. در مجموع، شش نوع مخلوط مورد آزمایش قرار گرفتند. بجز آزمایش خستگی، که در عمر ۴۲ روز و دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد، سایر آزمایش‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی و مدول

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص مکانیکی مخلوط بازیافتی امولسیون حاوی افزودنی‌های CKD و سرباره فولاد مورد بررسی قرار گرفت و این خواص با مخلوط بدون افزودنی و با افزودنی سیمان به‌عنوان متداول‌ترین

شده و باعث افزایش مقاومت در برابر خرابی های رطوبتی شود.

- مخلوط حاوی ترکیب CKD و سرباره فولاد دارای مدول برجهندگی بیشتری نسبت به هر یک از مخلوط های حاوی CKD و یا سرباره فولاد در زمان های عمل آوری مختلف بود. این امر نشان می دهد که استفاده از سرباره فولاد در مخلوط های بازیافتی امولسیونی به عنوان مکمل برای CKD، یک ماده شبه سیمانی را ایجاد کرد که منجر به افزایش سفتی در این مخلوط نسبت به مخلوط های حاوی یکی از این افزودنی ها شد. با افزایش مدت زمان عمل آوری و مخصوصاً کاهش دمای آزمایش، مدول برجهندگی مخلوط های بازیافتی امولسیونی حاوی ترکیب CKD و سرباره فولاد نسبت به مخلوط بدون افزودنی و مخلوط حاوی ۱٪ سیمان، افزایش بیشتری یافت. این افزایش به دلیل تسریع هیدراتاسیون و وقوع واکنش های پوزولانی در این مخلوط هاست.

- در سطوح کرنش اولیه کمتر، مخلوط های سفت تر و پوزولانی تر دارای عمر خستگی بیشتری بودند. با کاهش مقدار کرنش، عمر خستگی در این مخلوط ها افزایش یافت. به همین دلیل، مخلوط حاوی ترکیب CKD و سرباره فولاد دارای عمر خستگی کاملاً مناسبی در این سطوح کرنش بود. در سطوح کرنش بالاتر از محدوده های کرنش مرزی، عکس این مسأله صادق بود.

- از آنجایی که از مخلوط بازیافتی امولسیونی معمولاً به عنوان لایه اساس استفاده می شود و کرنش های وارده به لایه اساس روسازی معمولاً کمتر از ۲۰۰ میکرواسترین است، استفاده از ترکیب افزودنی های CKD و سرباره فولاد در مخلوط های بازیافتی امولسیونی به وضوح عمر خستگی را نسبت به مخلوط بدون افزودنی افزایش می دهد و همچنین، عمر خستگی قابل مقایسه ای با مخلوط حاوی سیمان دارد.

برجهندگی در دو عمر و سه دمای مختلف انجام شد. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- همه مخلوط های حاوی افزودنی، به دلیل شرکت رطوبت بهینه در واکنش های هیدراتاسیون و پوزولانی، خصوصیات مکانیکی بهتری را نسبت به مخلوط شاهد، مخصوصاً در عمر ۴۲ روزه، نشان دادند. در مخلوط حاوی ترکیب CKD و سرباره فولاد، افزایش چشمگیر استقامت مارشال نشان از وقوع واکنش های شیمیایی دارد که افزایش چسبندگی و سفتی را در پی داشته است و می تواند بیانگر نیاز به زمان عمل آوری کمتر، به دلیل گیرش سریع تر، باشد.

- به طور کلی، در همه دماها و سنین، مخلوط حاوی ۲٪ سیمان و مخلوط حاوی ترکیبی از CKD و CWA دارای مقاومت کششی بیشتر از سایر مخلوط ها بودند. در واقع، با ترکیب این دو نوع افزودنی، CKD به دلیل دارا بودن ترکیبات آلكالی به عنوان فعال کننده پوزولان ضایعاتی سرباره فولاد عمل کرده و سبب افزایش مقاومت آن می شود. در مقایسه بین اثر دما و اثر عمل آوری، تأثیر کاهش دما در افزایش مقاومت کششی مشهودتر بود.

- نتایج حاصل از آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد که با کاهش دما، مقاومت کششی مخلوط ها به دلیل افزایش سختی، در هر دو شرایط خشک و اشباع، افزایش یافت. با این حال، با کاهش دما، نسبت TSR افزایش یافت. در مخلوط حاوی ترکیبی از CKD و سرباره فولاد، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی افزایش یافته و حداقل معیار طراحی مخلوط های بازیافتی امولسیونی را برآورده کرد. در حالی که مخلوط حاوی ۶٪ سرباره فولاد، معیار مربوطه را در دمای ۲۵ درجه برآورده نکرد. در واقع، می توان گفت که افزودن CKD به سرباره فولاد ماده ای شبه سیمانی ایجاد می کند، که با وجود رطوبت می تواند باعث پیشرفت واکنش پوزولانی در مصالح سمتهی

- AASHTO-AGC-ARTBA Joint Cooperation Committee, Task Force No.38. 1998. "Report on cold recycling of asphalt pavements". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abbasnejad, S. Y. and Modarres, A. 2020. "Effect of setting accelerator additive on short-and long-term properties of cold recycled mixture containing bitumen emulsion-cement composites". *Road Mater. Pavement Design*, 21(7): 1932-1954.
- Abdel-Wahed, T. and Al Nageim, H. 2016. "Investigating the effects of cement and cement kiln dust as a filler on the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures". *Int. J. Civ. Eng. Tech.*, 7(1): 441-453.
- 1- Amouzadeh Omrani, M. and Hasirchian, M. 2020. "Assessing the effect of steel slag and reclaimed asphalt pavement on mechanical properties and pollution of roller compacted concrete pavement". *J. Transp. Infrastruct. Eng.*, 6(2): 87-108.
- Azadgoleh, M. A., Mohammadi, M. M., Ghodrati, A., Sharifi, S. S., Palizban, S. M. M., Ahmadi, A., Vahidi, E. and Ayar, P. 2022. "Characterization of contaminant leaching from asphalt pavements: A critical review of measurement methods, reclaimed asphalt pavement, porous asphalt, and waste-modified asphalt mixtures". *Water Res.*, 118584.
- Bolden IV, J. J. 2013. "Innovative uses of recycled and waste materials in construction application". Doctoral Dissertation, North Carolina Agricultural and Technical State University, USA.
- Boyes, A. J. 2011. "Reducing moisture damage in asphalt mixes using recycled waste additives". Master of Science Thesis, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Calif., USA.
- Brown, S. and Needham, D. 2000. "A study of cement modified bitumen emulsion mixtures". *Asphalt Paving Tech.*, 69: 92-121.
- Cizkova, Z. and Suda, J. 2017. "Viscoelastic behaviour of cold recycled asphalt mixes". In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236 (1): 012017.
- Cross, S. A. 1999. "Experimental cold in-place recycling with hydrated lime". *Transp. Res. Record*, 1684(1): 186-193.
- Cross, S. A. and Young, D. A. 1997. "Evaluation of type C fly ash in cold in-place recycling". *Transp. Res. Record*, 1583(1): 82-90.
- Du, S. 2015. "Performance characteristic of cold recycled mixture with asphalt emulsion and chemical additives". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015: 271596.
- Dulaimi, A., Al-Busaltan, S., Kadhim, M. A., Al-Khafaji, R., Sadique, M., Al Nageim, H., Ibrahim, R.K., Awrejcewicz, J., Pawlowski, W. and Mahdi, J. M. 2022. "A sustainable cold mix asphalt mixture comprising paper sludge ash and cement kiln dust". *Sustain.*, 14(16): 10253.
- EN 12697-24. 2004. "Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt- Part 24: Resistance to fatigue". European Committee for Standardization.
- Gao, L., Ni, F., Charnot, S. and Li, Q. 2014. "High-temperature performance of multilayer pavement with cold in-place recycling mixtures". *Road Mater. Pavement Design*, 15(4): 804-819.
- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., Saeedi Azizkandi, A. and Moghadas Nejad, F. 2021. "Influence of sodium chloride on cement kiln dust-treated clayey soil: Strength properties, cost analysis, and environmental impact". *Environ., Develop. Sustain.*, 23(1): 683-702.
- Jang, Y. I., Park, W. S., Kim, S. W. and Lee, B. J. 2015. "Durability of recycled asphalt pavement using cementless binders and polymers". *Contemp. Eng. Sci.*, 8: 14.
- Kavussi, A. and Modarres, A. 2010a. "A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results". *Constr. Build. Mater.*, 24(11): 2252-2259.
- Kavussi, A. and Modarres, A. 2010b. "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement". *Constr. Build. Mater.*, 24(10): 1920-1927.
- Kavussi, A., Nejad, F.M. and Modarres, A. 2011. "Laboratory fatigue models for recycled mixes with pozzolanic cement and bitumen emulsion". *J. Civ. Eng. Manag.*, 17(1): 98-107.
- Li, Q., Zhu, C., Zhang, H. and Zhang, S. 2022. "Evaluation on long-term performance of emulsified asphalt cold recycled mixture incorporating fly ash by mechanistic and microscopic characterization". *Constr. Build. Mater.*, 319: 126120.
- Lin, J., Hong, J. and Xiao, Y. 2017. "Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement". *J. Clean. Prod.*, 156: 337-344.
- Liu, Z., Sun, L., Zhai, J. and Huang, W. 2022. "A review of design methods for cold in-place recycling asphalt mixtures: Design processes, key parameters, and evaluation". *J. Clean. Prod.*, 2022: 133530.

- Liu, H., Kuang, A., Wang, Z., Chu, C., Yu, H. and Lv, S. 2023. "Investigation on fracture and fatigue performance of cold recycling emulsified asphalt mixture based on acoustic emission parameters". *J. Clean. Prod.*, 139285.
- Martínez-Echevarría, M. J., Recasens, R. M., Gámez, M. D. C. R. and Ondina, A. M. 2012. "In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions". *Constr. Build. Mater.*, 36: 918-924.
- Miller, H., Daniel, J. S., Eftekhari, S., Kestler, M. and Mallick, R. B. 2017. "Research on sustainable pavements: Changes in in-place properties of recycled layers due to temperature and moisture variations". In: *Airfield and Highway Pavements*, pp. 69-78.
- Modarres, A. and Ayar, P. 2014. "Coal waste application in recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion". *J. Clean. Prod.*, 83: 263-272.
- Modarres, A. and Ayar, P. 2016. "Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement", *Int. J. Pavement Eng.*, 17(3): 211-224.
- Modarres, A., Ramyar, H. and Ayar, P. 2015. "Effect of cement kiln dust on the low-temperature durability and fatigue life of hot mix asphalt". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 110: 59-66.
- Moghadam, B. B. and Mollashahi, H. F. 2017. "Suggesting a simple design method for cold recycled asphalt mixes with asphalt emulsion". *J. Civ. Eng. Manag.*, 23(7): 966-976.
- Naser, M., Abdel-Jaber, M. T., Al-Shamayleh, R., Ibrahim, R., Louzi, N. and AlKhrissat, T. 2023. "Improving the mechanical properties of recycled asphalt pavement mixtures using steel slag and silica fume as a filler". *Build.*, 13(1): 132.
- Recycling, C. 2010. "Wirtgen cold recycling technology". Wirtgen GmbH.
- Siddique, R. 2006. "Utilization of cement kiln dust (CKD) in cement mortar and concrete- an overview". *Resour., Conserv. Recyc.*, 48(4): 315-338.
- Siddique, R. 2008. "Cement kiln dust". In: *Waste materials and by-products in concrete*, Springer, Berlin, pp. 351-380.
- Thomas, T., Kadrams, A. and Huffman, J. 2000. "Cold in-place recycling on Kansas US-283". In: *79th Annual Meeting of TRB*.
- Tian, T., Jiang, Y., Yi, Y., Fan, J., Yang, D. and Deng, C. 2022. "Fiber-emulsified asphalt cold-recycled mixture produced using vertical vibration compaction: Performance study". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(7): 04022114.
- Wang, Y., Leng, Z., Li, X. and Hu, C. 2018. "Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance". *J. Clean. Prod.*, 171: 1031-1038.
- Williams, R. C. and Breakah, T. M. 2010. "Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the Nottingham asphalt test equipment". In: *Trans. Project Reports*, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- Witzak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. and Von Quintus, H. 2002. "Simple performance test for Superpave mix design". *National Cooperative Highway Research Program Report*, NCHRP Report 465.
- Zankavich, V., Khroustalev, B., Veranko, U., Busel, A., Lira, S., Hou, D. and Li, Z. 2020. "Fatigue resistance of modified cold reclaimed mixes with 100% content of recycled asphalt pavement (RAP)". *SN Appl. Sci.*, 2(12): 1-13.
- Zhao, Z., Jiang, J., Chen, Z. and Ni, F. 2022. "Moisture migration of bitumen emulsion-based cold in-place recycling pavement after compaction: Real-time field measurement and laboratory investigation". *J. Clean. Prod.*, 2022: 132213.