



University Of Qom

Investigating the Effect of Cement and Fibers Containing Fatty Arbocell on the Mechanical and Moisture Properties of Cold Emulsion Asphalt Mixtures

Alireza Motamednia¹, Hamid Shirmohammadi², Morteza Asadamregi³

1. PhD Candidate, Tarrahan Parseh Transportation Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: a_motamednia@yahoo.com
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: h.shirmohammadi@urmia.ac.ir
3. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. E-mail: m_asadamraji@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 29 Apr 2023
Revised 09 Aug 2023
Accepted 13 Aug 2023

Keywords:
Cold Emulsified Asphalt
Modified Lottman,
Marshall Stability,
Fatty Arbocel,
Nicholson.

ABSTRACT

Cold emulsion asphalts have advantages and disadvantages. The advantages of this type of mixture are related to the low temperature of production, environmental considerations, and its portability to long distances. One of the main reasons for the poor performance of this type of asphalt is its moisture content. The water penetration hinders the fracture of emulsion bitumen, and after that, the mixture's resistance to moisture is reduced. The present research used the modified Marshall method to determine the optimal bitumen percentage. For this reason, one to three percent by weight of the asphalt-cement mixture and 0.3 to 0.5 percent by weight of fiber mixture containing fatty arbocell were added. The resulting samples were subjected to the Marshall strength, Marshall index modified Lottman and Nicholson tests. Based on the results, the Marshall strength was 47.88%, the Marshall index was 139%, adhesion was 41%, the ratio of indirect tensile strength was 21%, and the fluidity was 36.47%. According to the data obtained from this research, it is suggested that 3% cement and 0.3% fatty arbocell fibers should apply in cold asphalt mixtures.

Cite this article: Motamadnia, Alireza., Shirmohammadi, Hamid., & Asadamregi, Morteza. (2023). Investigating the effect of cement and fibers containing fatty arbocell on the mechanical and moisture properties of cold emulsion asphalt mixtures. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 111-123. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9372.1477>



بررسی تأثیر سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب بر ویژگی‌های مکانیکی و رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی سرد امولسیون

علیرضا معتمدنیا^۱، حمید شیرمحمدی^۲، مرتضی اسدامرجی^۳

۱. دانشجوی دکتری عمران، پژوهشگاه حمل و نقل طراحان پارسه، تهران، ایران. رایانامه: a_motamednia@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ایران. رایانامه: h.shirmohammadi@urmia.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_asadamraji@sbu.ac.ir

چکیده

آسفالت‌های سرد امولسیونی، دارای مزایا و معایبی می‌باشند. مزایای این نوع مخلوط‌ها، به دمای کم تولید، ملاحظات زیست‌محیطی و قابلیت حمل آن برای مسافت‌های زیاد مربوط می‌شود. یکی از دلایل اصلی عملکرد ضعیف این نوع آسفالت، ضعف رطوبتی است. نفوذ آب از عملیات شکست قیر امولسیونی ممانعت به عمل می‌آورد و در این راستا، مقاومت مخلوط در برابر رطوبت کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر، پس از تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال اصلاح شده، به میزان ۱ تا ۳ درصد وزنی، مخلوط آسفالتی سیمان و ۰/۳ تا ۰/۵ درصد وزنی، الیاف حاوی آربوسل‌های چرب به مخلوط اضافه گردید. نمونه‌های حاصل، تحت آزمایش‌های میزان استحکام مارشال، روانی، شاخص مارشال، لاتمن اصلاح شده و نیکلسون قرار گرفت. بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، استحکام مارشال ۴۷/۸۸ درصد، شاخص مارشال تا میزان قابل توجه ۱۳۹ درصد، چسبندگی ۴۱ درصد، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۱ درصد، افزایش و روانی ۳۶/۴۷ درصد کاهش می‌یابد. این تحقیق، استفاده همزمان سیمان، ۳ درصد و الیاف حاوی آربوسل چرب، ۰/۳ درصد در مخلوط‌های آسفالت سرد را توصیه می‌کند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

کلیدواژه‌ها:

آسفالت سرد امولسیون،
لاتمن اصلاح شده،
استحکام مارشال،
آربوسل چرب،
نیکلسون.

استناد: معتمدنیا، علیرضا؛ شیرمحمدی، حمید؛ و اسدامرجی، مرتضی. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب بر ویژگی‌های مکانیکی و رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی سرد امولسیونی. *پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی*، ۹(۲)، ۱۱۱-۱۲۳.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9372.1477>

۱- مقدمه

امتیازات مهمی می‌باشند [۵]. تحقیقات نشان می‌دهد که در مراحل تولید، حمل و پخش مخلوط‌های آسفالت سرد در مقایسه با مخلوط‌های آسفالت گرم تا حدود ۲۵ درصد در انرژی صرفه‌جویی می‌گردد [۶]. آسفالت‌های سرد دارای پتانسیل بسیار خوبی برای بازیافت می‌باشند که این مورد نیز از دو جنبه زیست‌محیطی و اقتصادی حائز اهمیت است [۷]. نکته دیگری که می‌توان به آن توجه و اشاره نمود؛ بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی است که همواره یکی از مسائل حائز اهمیت در مهندسی روسازی بوده است. افزودنی‌ها در چند دهه اخیر به طور گسترده در آسفالت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸]. پژوهش‌ها حاکی از نقش فیلرهای غیرمعدنی در افزایش عمر روکش‌های آسفالتی است؛ به طوری که باعث بهبود ۱۵ درصدی نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر بتن بازیافتی در مقایسه با فیلر سنگ آهک پس از نخستین چرخه انجماد- ذوب می‌گردد. اگرچه نتایج انرژی آزاد سطحی با نتایج خصوصیات مکانیکی نخستین چرخه انجماد- ذوب همخوانی دارد؛ ولی نمی‌تواند بیانگر رفتار بلندمدت مخلوط آسفالتی در چندین چرخه انجماد- ذوب متوالی باشد [۹]. مطالعه زارعی و همکاران نیز بیانگر این نتیجه است که افزودن نانوسیلیس می‌تواند بخش قابل توجهی از افت مقاومت ناشی از چرخه آسیب انجماد- ذوب را بازیابی نموده و رفتار بلندمدت مخلوط آسفالتی را در شرایط بارگذاری و انجماد- ذوب بهبود دهد [۱۰ و ۱۱]. بررسی‌های اشمیت^۱ و همکاران، نشان می‌دهد که افزودن سیمان و آهک به مخلوط آسفالت گرم، منجر به افزایش سرعت کسب استحکام مارشال این نوع مخلوط‌ها می‌گردد [۱۲]. افزودن سیمان پرتلند و آهک باعث افزایش میزان استحکام مارشال، مدول برجهنگی، مقاومت کششی و همچنین افزایش مقاومت در برابر رطوبت و تغییرشکل‌های دائمی می‌شود. افزودن سیمان پرتلند و

آسفالت‌های سرد امولسیون، معمولاً از اختلاط مصالح سنگی و قیر محلول یا امولسیون در سطح آماده شده در کارخانه با گرمای کم ساخته می‌شود. نحوه ساختن این نوع مخلوط به این ترتیب است که پس از رسیدن میزان رطوبت مصالح سنگی به کمتر از ۳ درصد، قیر به میزان ۳ تا ۶ درصد وزنی مصالح سنگی، به مخلوط افزوده می‌شود. مصالح سنگی و قیر به کمک ماشین‌آلات اختلاط، نظیر تیغه‌گریدر یا مخلوط‌کن دوار به خوبی مخلوط می‌شوند تا قیر، سطح تمام دانه‌های مصالح سنگی را به طور یکنواخت اندود کند. از این نوع آسفالت برای ساختن لایه‌های رویه، اساس و زیراساس آسفالتی استفاده می‌شود، چون در ساخت این نوع آسفالت احتیاجی به گرم کردن مصالح سنگی و همچنین لزومی به استفاده از ماشین‌آلات ویژه نیست. بنابراین این نوع روسازی، اقتصادی می‌باشد [۱]. در کشور ما نیز آسفالت‌های سرد امولسیونی با وجود داشتن امتیازات زیاد به دلیل عملکرد پایین نسبت به آسفالت گرم کمتر مورد استفاده قرار گرفته است، دلیل اصلی این عملکرد ضعیف را می‌توان در نفوذپذیری این نوع آسفالت جست‌وجو کرد [۲]. نفوذ آب مانع از شکست قیر امولسیونی و پوشش کامل سنگدانه شده و در نهایت، منجر به کاهش عملکرد مخلوط آسفالت سرد می‌گردد [۳]. یکی از دلایل اضمحلال زودرس مخلوط‌های آسفالتی سرد، خرابی ناشی از تأثیر رطوبت به دلیل از دست دادن مقاومت و دوام است [۳]. رطوبت مهمترین شرایط محیطی است که به طور معکوس بر روی کیفیت مخلوط آسفالت سرد تأثیر می‌گذارد. علاوه بر آن به صورت مستقیم سبب عریان‌شدگی مخلوط آسفالت سرد می‌گردد و موجب ایجاد سایر خرابی‌های متداول روسازی مانند ترک‌خوردگی خستگی، تغییرشکل ماندگار و خرابی‌های حرارتی نیز می‌شود [۴]. مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر امولسیونی از نظر اقتصادی، لجستیکی به دلیل اینکه مصالح و قیر نیاز به گرم شدن ندارند؛ دارای

^۱- Schmidt

ساخته شده با الیاف سلولز، اندکی بیشتر از کف است. از طرفی، استقامت مارشال و نشانه سختی مارشال در مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سنگی آهکی، بیشتر از مرمیت بوده و استقامت مارشال و نشانه سختی مارشال در مخلوط‌های الیاف کف، بیشتر از سلولز است [۱۹].

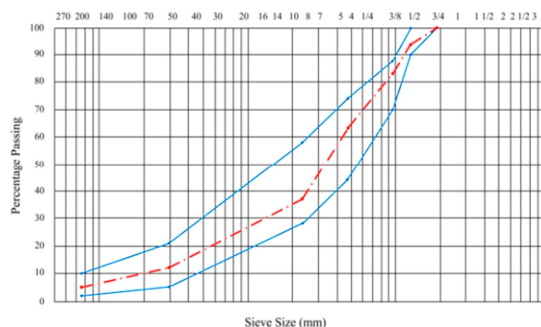
نتایج پژوهش دانگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۸، نشان داد که ترکیب سیمان و نانو رس‌ها موجب بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالت سرد در برابر رطوبت می‌گردد [۲۰]. تحقیقات میدانی توسط محققان، نشان می‌دهد ترکیب سیمان و الیاف پلیمری منجر به بهبود رفتار این نوع ترکیب‌ها در برابر ویژگی‌های رطوبتی می‌گردد. افزودن بوتادین استیرن چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها را به شدت بهبود می‌بخشد و بدین ترتیب مقاومت مخلوط‌های آسفالت سرد را در برابر خرابی‌های رطوبتی افزایش می‌دهد [۲۱]. کامپوزیت لاستیک استیرن بوتادین-نانو رس برای اصلاح ویژگی‌های قیر در مخلوط‌های آسفالتی از نظر مقاومت در برابر رطوبت استفاده می‌شود. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های نانو کامپوزیت با نسبت‌های ۴:۶ و ۳:۷ به اندازه ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر، نشان داد که مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک، تا ۶/۶ درصد، در حالت تر تا ۳۰/۲۵ درصد و نسبت حالت تر به خشک تا ۲۵/۹۶ درصد بهبود می‌یابد [۲۲]. در یک پژوهش آزمایشگاهی، رفتار شکست مخلوط‌های آسفالت معمولی و اصلاح شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی استر حاوی ترک‌های عمودی و زاویه‌ای، ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تمام مخلوط‌های اصلاح شده با ۶ درصد لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی استر، مقاومت بهتری نسبت به نمونه معمولی در شرایط آسیب ناشی از آسیب سیکل انجماد-ذوب دارند [۲۳]. افزودن پلیمرها منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیکی مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم

دو غاب آهک در قیاس با آهک شکفته نتایج بهتری را دربردارد. همچنین با توجه به نتایج آزمایشات و به دلیل مشکلات تهیه دو غاب آهک نسبت به سیمان پرتلند، استفاده از سیمان پرتلند پیشنهاد می‌شود [۱۳]. افزودن سیمان به مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای امولسیون منجر به افزایش مدول الاستیکی مخلوط می‌گردد به تبع آن میزان صلبیت و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی افزایش می‌یابد [۱۴]. استفاده از آهک می‌تواند نقش مفیدی در ممانعت از عریان‌شدگی سنگدانه‌ای آسفالت سرد داشته باشد. افزودن سیمان به مخلوط‌های آسفالت سرد منجر به بهبود ویژگی‌های مکانیکی آنها می‌گردد. بر مبنای نتایج به دست آمده، استفاده از ۲ درصد آهک هیدراته، ۴ درصد فیلر سنگ آهک، عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی به صورت قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۵ و ۱۶]. استفاده از سیمان به عنوان فیلر در آسفالت‌های سرد حاوی سنگدانه‌های آهکی منجر به بهبود عملکرد این نوع مخلوط‌ها می‌گردد. بر اساس مطالعات دارداک^۲، با افزودن سیمان به مخلوط‌های آسفالتی می‌توان میزان مقاومت مخلوط آسفالتی را تا ۲ و حتی در بعضی موارد تا ۳ برابر افزایش داد [۱۷]. شاخص‌های انرژی روش مناسبی برای مشخص کردن مقاومت مخلوط‌های آسفالت سرد در برابر خرابی‌های رطوبتی می‌باشد. با توجه به این نکته می‌توان بیان نمود که سنگدانه‌های آهکی رفتار بهتری از سنگدانه‌های گرانیتی و بازالتی در برابر خرابی‌های رطوبتی از خود نشان می‌دهند [۱۸]. مکارچیان و همکاران، تأثیر الیاف طبیعی سلولزی و کف بر مشخصات مکانیکی آسفالت ساخته شده با سنگدانه‌های آهکی و مرمیت را بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که درصد قیر بهینه مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سنگی آهکی، بیشتر از مرمیت است. همچنین درصد قیر بهینه مخلوط‌های

³- Dong

²- Dardak

در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایشات مکانیکی تعیین کیفیت سنگ‌دانه‌ها، براساس استانداردهای رایج طبق جدول ۲ انجام شد.



شکل ۱- منحنی دانه بندی مصالح سنگدانه‌ای مصرفی

جدول ۱- درصد فراوانی شن و ماسه

ردیف	نوع مصالح	درصد فراوانی
۱	شن	۴۴
۲	ماسه	۵۰
۳	ریزدانه	۶

همچنین سیمان مورد استفاده در تحقیق از نوع پرتلند نوع ۲ است؛ که از کارخانه سیمان صوفیان تهیه شده و مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی این نوع سیمان به شرح جداول ۳ و ۴ می‌باشد.

قیر امولسیون مورد استفاده در این پژوهش، از نوع کاتیونیک دیرشکن (CSS-1) محصول شرکت نفت پاسارگاد می‌باشد. لازم به توضیح است که فرآیند شکست قیرهای امولسیونی به فرآیندی گفته می‌شود که طی این فرآیند آب قیر امولسیونی تبخیر و قیر به سنگدانه‌ها می‌چسبد که سرعت این فرآیند یکی از مبنای طبقه‌بندی قیرهای امولسیونی می‌باشد. نتایج آزمون‌های انجام یافته بر روی نمونه قیر تهیه شده به شرح جدول ۵، می‌باشد.

الیاف ترکیبی از فیبرهای سلولزی و قیر است که جهت استفاده راحت و نگهداری بلندمدت به شکل قرص تولید و ارائه می‌شود. شکل ۲، نمایی از این الیاف را نشان می‌دهد. این الیاف امکان پخش سریع و همگن در آسفالت را داشته و میزان مصرف این الیاف ۰/۲ تا ۰/۳ درصد وزنی مخلوط آسفالتی است.

می‌گردد [۲۴ و ۲۵]. نتایج آزمایشات بر روی مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم حاوی افزودنی نانوبنتونیت و آربوسل‌های چربی نشان می‌دهد که افزایش این افزودنی‌ها، مقاومت مخلوط را در برابر آسیب رطوبتی بهبود می‌بخشد. همچنین استفاده از مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم حاوی افزودنی نانوبنتونیت و آربوسل‌های چرب منجر به افزایش سختی مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم می‌گردد [۲۶].

با مطالعه پژوهش‌های انجام یافته که در تحقیق حاضر به آنها اشاره گردیده است ملاحظه می‌گردد که تحقیق جامعی که نقصان‌های رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی سرد را مورد بررسی قرار داده و برای اصلاح آن راه‌حل ارائه دهد، وجود ندارد و این امر در تحقیق حاضر میسر گردید. در این راستا، پس از تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال اصلاح شده و افزودن درصد معین مخلوط آسفالتی سیمان و الیاف حاوی آربوسل‌های چرب، نمونه‌های حاصل، تحت آزمایشات میزان استحکام مارشال، روانی، شاخص مارشال، لاتمن اصلاح شده و نیکلسون قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مورد استفاده

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق از جنس سنگ آهک است که به عنوان سنگدانه مقاوم در برابر خرابی رطوبتی شناخته می‌شود و از معادن اطراف شهر تبریز با سازندهای پالئوژن با لیتولوژی ماسه آهک تهیه شده و آزمون دانه‌بندی آن مطابق با استاندارد ASTM انجام گردید [۲۷]. منحنی دانه‌بندی با در نظر گرفتن حدود بالا و پایین تعیین شده در آیین‌نامه روسازی ایران با استاندارد آزمون دانه‌بندی ASTM D-3910 در شکل ۱ ارائه شده است. در پژوهش حاضر از دانه‌بندی پیوسته چهار آستر و رویه آیین‌نامه روسازی راه ایران استفاده گردیده است. شکل ۱، منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی را در این تحقیق نشان می‌دهد. درصد فراوانی شن و ماسه

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سنگدانه‌ها

حدود آیین‌نامه	مقادیر	واحد	روش آزمایش	آزمایش
-	۲/۷۵۱	gr/cm ³	ASTM C-127-15 [۲۷]	وزن مخصوص درشت‌دانه
-	۲/۷۸۷	gr/cm ³	ASTM C-128-15 [۲۸]	وزن مخصوص ریزدانه
حداکثر ۳۰	۱۹	درصد	ASTM C-131 [۲۹]	سایش لس آنجلس
حداکثر ۲/۸	۱/۶	درصد	ASTM C-127-15 [۲۷]	درصد جذب آب
حداکثر ۱۵	۱۰/۸	درصد	ASTM D-4791 [۳۰]	درصد پولکی

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمن مصرفی

نتیجه آزمون	ویژگی‌های مکانیکی	نتیجه آزمون	ویژگی‌های فیزیکی
۳۱/۱	مقاومت فشاری ۷ روزه (N/mm ²)	۳/۱۱۹	وزن مخصوص برحسب (gr/cm ³)
۴۴/۷	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (N/mm ²)	۲۹۹۱	بلین ریزی برحسب (gr/cm ²)

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سیمن مصرفی [۳۱]

K ₂ O	Na ₂ O	So ₃	Mgo	Cao	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیبات
۱/۰۳	۰/۱۹	۲/۸۹	۳/۱۱	۶۱/۴۴	۳/۰۱	۶/۳۳	۲۱/۶	مقدار (درصد)

جدول ۵- خصوصیات قیر امولسیون مصرفی

حدود مشخصات قیرهای CSS-1 طبق نشریه ۲۳۴		نتایج	روش آزمایش	نوع آزمایش
Max	Min			
-	-	۱/۱۵	ASTM D70	وزن مخصوص
۱۰۰	۲۰	۴۲	ASTM D2170	کندروانی در ۲۵ درجه سانتیگراد (s)
-	۳۸	۴۴	ASTM D3143	نقطه اشتعال (°C)
۱	-	۰/۷۷	ASTM D244 [۳۲]	پایداری در ذخیره‌سازی پس از ۲۴ ساعت (درصد)
-	۵۷	۰/۶۲	ASTM D244	درصد حجمی قیر باقیمانده از تقطیر ۳۶۰ درجه سانتیگراد
-	۴۰	۱۰۱	ASTM D11370	خاصیت انگمی قیر باقیمانده (cm)
-	۹۷/۵	۹۸/۰۸	ASTM D2042	حلالیت قیر باقیمانده در تری‌کلرواتیلن (درصد)



الیاف استفاده شده از نوع سلولزی بوده و حاوی آربوسل‌های چرب تولید شده توسط شرکت JCR کشور آلمان می‌باشد. در جدول ۶، ویژگی‌های فیزیکی الیاف ارائه شده است.

۲-۲- آزمایش‌ها

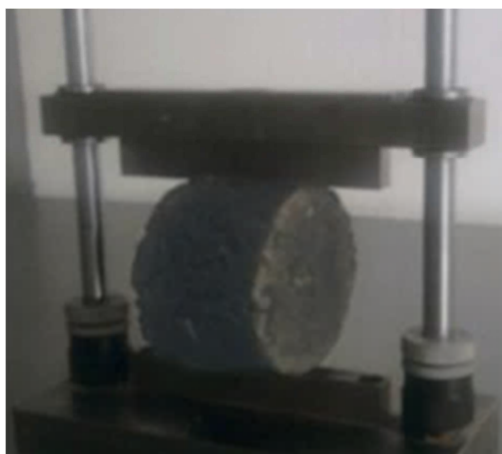
شکل ۲- الیاف حاوی آربوسل چرب بکار رفته در تحقیق حاضر سپس قیر امولسیونی تا دمای ۶۰ درجه حرارت داده شد و با پنج درصد مختلف (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶) به نسبت وزن مخلوط آسفالتی، با مصالح مخلوط شده اضافه شد و در قالب‌های مارشال به قطر ۱۵/۲ و ارتفاع ۹/۵۲

در این پژوهش جهت تعیین درصد قیر بهینه و طرح اختلاط مخلوط از روش مارشال اصلاح شده استفاده شد. مصالح سنگی دانه‌بندی شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۶۰ الی ۱۷۰ درجه قرار داده تا آب موجود در میان سنگدانه‌ها تبخیر شود.

به سنگ‌دانه‌ها افزوده و به مدت ۹۰ ثانیه داخل ارلن، عمل اختلاط انجام می‌پذیرد.



شکل ۳- آزمایش استحکام مارشال نمونه‌های حاوی ۱ درصد سیمان و ۰/۳ درصد الیاف



شکل ۴- آزمایش رطوبتی لاتمن نمونه‌ها حاوی ۳ درصد سیمان و ۰/۵ درصد الیاف

در نهایت، نمونه‌ها را در ظروف شیشه‌ای آزمایشگاهی قرار داده و روی آن آب اضافه شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه نگهداری، سپس زیر نور، میزان جداسازی به صورت بصری تشخیص داده می‌شود [۳۴]. شکل ۵، نمونه‌های تحت آزمایش جداسازی نیکلسون را در آزمایشگاه برای پژوهش حاضر، نشان می‌دهد. در آزمایش آب جوشان، درجات عریان‌شدگی به صورت بصری، پس از جوشاندن مخلوط آسفالتی متراکم نشده به مدت ۱۰ دقیقه تعیین می‌شود. در حدود ۵۰۰ گرم آب در ظرفی ریخته شده و به آن حرارت داده می‌شود تا به نقطه جوش برسد؛ سپس ۲۵۰ گرم از نمونه متراکم نشده، حداکثر تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد و برای مدت ۱۰ دقیقه درون آب جوش حرارت داده می‌شود و

سانتیمتر ریخته و در نهایت با اعمال ۷۵ ضربه چکش مارشال ۱۰/۲ کیلوگرمی که با ارتفاع سقوط ۴۵ سانتیمتر بر روی نمونه، متراکم گردید.

جدول ۶- ویژگی‌های فیزیکی الیاف [۲۷]

اندازه	پارامتر
۸۳٪	مقدار سلولز
۱۰٪	درصد قیر ۷۰/۵۰
۷٪	درصد عبوری از الک ۳/۵۵ میلیمتر
۵۰۰	دمای اشتعال (°C)
۷٪	درصد چربی اسید آمینه آمید

در روش طرح اختلاط مارشال اصلاح شده، درصد قیر بهینه براساس میانگین مقادیر درصد قیری که بیشترین استحکام مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین مقدار فضای خالی را در بتن آسفالتی سبب می‌شوند؛ تعیین می‌گردد [۲۷]. شاخص مارشال، میزان سفتی و مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های ماندگار را منعکس می‌کند. به طوری که با افزایش مقدار این شاخص، می‌توان گفت مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نیز در برابر تغییرشکل‌ها بهبود می‌یابد [۳۳]. لاتمن آزمایش کشش غیرمستقیم را برای پیش بینی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی تحت شرایط خدمت‌دهی به ترافیک واقعی ارائه کرده است. در این آزمایش که طبق استاندارد AASHTO T283 است؛ یک گروه از نمونه‌ها تحت شرایط خشک مورد آزمایش قرار می‌گیرند و یک گروه دیگر قبل از انجام آزمایش عمل‌آوری می‌شوند. شکل‌های ۳ و ۴ آزمایش‌های استحکام مارشال و لاتمن نمونه‌های آزمایش را نشان می‌دهد.

برای تعیین مقاومت قیر در برابر جدا شدن سنگ‌دانه‌ها به دلیل اثر آب، آزمایش جداسازی نیکلسون انجام می‌گردد. این آزمون روی مخلوط آسفالتی غیرمتراکم انجام می‌شود. ۱۰۰ گرم از سنگ‌دانه‌های مابین الک‌های 3/8 - 1/4 اینچ به روش چارک‌زنی انتخاب و سپس سنگ‌دانه، شسته می‌شود. سنگ‌دانه‌ها، در دمای ۱۵۰ درجه تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده، سپس قیر

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (2)$$

که در آنها، ITS، مقاومت کششی غیرمستقیم، P_{max} بیشینه بار وارده، t ، ضخامت نمونه (میلی‌متر)، D ، قطر نمونه، ITS_{wet} ، مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت مرطوب، ITS_{dry} ، مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و TSR_T ، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم است [۳۶].

۳- نتایج و بحث

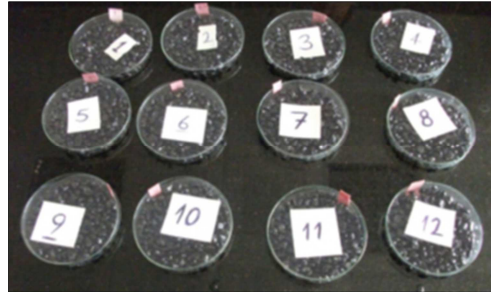
مراحل طرح اختلاط به روش مارشال اصلاح شده با استاندارد ASTM D-5581، انجام و مقدار درصد قیر بهینه تعیین شد. نتایج حاصل در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج، ۵/۶ درصد قیر به عنوان قیر بهینه مخلوطها تعیین و سایر پارامترهای نمونه‌های تهیه شده با این درصد قیر، بسیار نزدیک به شرایط پذیرش مخلوطهای آسفالت گرم تعیین شده می‌باشد.

به نمونه‌های حاوی ۵/۶ درصد وزنی قیر امولسیون به ترتیب ۰/۳ و ۰/۵ الیاف حاوی آربوسل چرب و ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی سیمان پرتلند تیپ ۲ افزوده شده است. برای جلوگیری از تکرار، نمونه‌های تحت آزمایش، مطابق جدول ۸، نامگذاری شده‌اند.

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایشات استحکام مارشال

نمونه‌ها پس از طی مهلت ۷ روزه به منظور انجام فرآیند عمل‌آوری کامل، تحت آزمایش میزان استحکام مارشال قرار داده شدند که نتایج در نمودارهای زیر مشاهده می‌گردد.

هر سه دقیقه یکبار محتویات درون ظرف هم زده می‌شود و در انتها قیرهای روی سطح آب با استفاده از سرخ جدا شده تا باعث پوشش مجدد مصالح نگردد.



شکل ۵- آزمایش جداسازی نیکلسون

پس از سرد شدن محتویات ظرف تا دمای اتاق، آب موجود در ظرف خالی شده و برای بررسی‌های بیشتر، مخلوط را بر روی یک سطح سفید قرار می‌دهند. معیار خرابی با مشاهدات بصری مصالح عریان شده تعیین می‌گردد [۳۵]. شکل ۶، نمونه‌های تحت تست جوشان تگزاس را برای پژوهش حاضر، نشان می‌دهد.



شکل ۶- تست جوشان تگزاس

نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) از نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اشباع به خشک حاصل می‌گردد [۲۶]. معادلات (۱) و (۲)، نحوه محاسبه TSR را نشان می‌دهد.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi Dt} \quad (1)$$

جدول ۷- مشخصات مکانیکی مخلوط آسفالتی

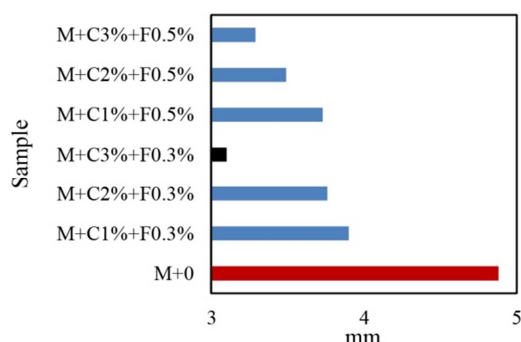
فضای خالی پر شده با قیر (درصد)	فضاهای خالی سنگی (درصد)	فضای خالی (درصد)	وزن مخصوص تئوریک مخلوط (gr/cm ³)	وزن مخصوص مخلوط (gr/cm ³)	قیر بهینه (درصد)
۷۵/۶۳	۱۶/۷۷	۴/۰۸	۲/۳۹۹	۲/۳۰۱	۵/۶

جدول ۸- مشخصات مکانیکی سنگدانه‌ها

نمونه	مخلوط	نام اختصاری
۱	بدون افزودنی	M+0
۲	افزودن ۱٪ سیمان و ۰/۳٪ الیاف	M+C1%+F0.3%
۳	افزودن ۲٪ سیمان و ۰/۳٪ الیاف	M+C2%+F0.3%
۴	افزودن ۳٪ سیمان و ۰/۳٪ الیاف	M+C3%+F0.3%
۵	افزودن ۱٪ سیمان و ۰/۵٪ الیاف	M+C1%+F0.5%
۶	افزودن ۲٪ سیمان و ۰/۵٪ الیاف	M+C2%+F0.5%
۷	افزودن ۳٪ سیمان و ۰/۵٪ الیاف	M+C3%+F0.5%

جدول ۹- درصد افزایش میزان استحکام مارشال نمونه‌های با افزودنی نسبت به نمونه بدون افزودنی

نمونه	درصد افزایش
M+C1%+F0.3%	۱۷/۳۱
M+C2%+F0.3%	۴۰/۳۸
M+C3%+F0.3%	۴۷/۸۸
M+C1%+F0.5%	۱۲/۲۲
M+C2%+F0.5%	۳۰/۷۷
M+C3%+F0.5%	۳۶/۵۴



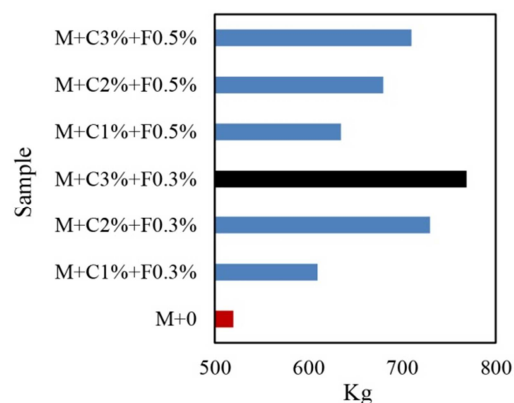
شکل ۸- تغییرات میزان روانی برحسب میلی‌متر

جدول ۱۰- درصد کاهش میزان روانی مارشال نمونه‌های با افزودنی نسبت به نمونه بدون افزودنی

نمونه	درصد کاهش
M+C1%+F0.3%	-۲۰/۰۷
M+C2%+F0.3%	-۲۲/۹۵
M+C3%+F0.3%	-۳۶/۴۷
M+C1%+F0.5%	-۲۳/۵۶
M+C2%+F0.5%	-۲۷/۴۸
M+C3%+F0.5%	-۳۲/۵۸

شکل ۷، میزان استحکام مارشال نمونه‌ها و جدول

۹، درصد افزایش استحکام مارشال نمونه‌ها را نسبت به نمونه بدون افزودنی، شکل ۸، نمودار میزان روانی برحسب میلی‌متر و جدول ۱۰، درصد کاهش میزان روانی نسبت به نمونه بدون افزودنی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار استحکام مارشال نمونه‌ها

همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ و جداول ۹ و ۱۰، ملاحظه می‌گردد؛ نمونه با افزودن ۳ درصد سیمان و ۰/۳ درصد الیاف بهترین عملکرد را داشته و نسبت به نمونه بدون افزودنی، میزان استحکام مارشال ۴۷/۸۸ درصد افزایش و میزان روانی ۳۶/۴۷ درصد کاهش می‌یابد. ترکیب سیمان و الیاف با ایجاد شبکه سه‌بعدی موجب افزایش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌خوردگی می‌گردد و در نهایت، استحکام مخلوط افزایش می‌یابد. بررسی دقیق منحنی مقایسه‌ای نشان می‌دهد ترکیب افزودنی‌های مذکور، استحکام این مخلوط‌ها را تا حدود پذیرش استحکام مخلوط‌های آسفالت گرم می‌تواند افزایش دهد.

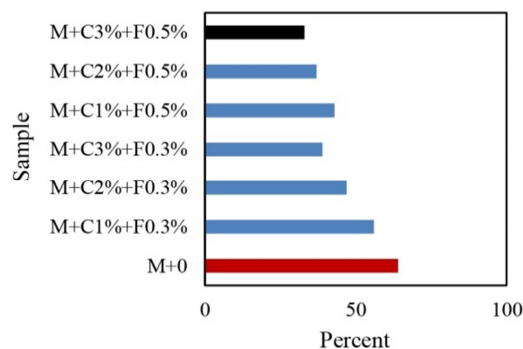
۲-۳- تحلیل نتایج شاخص مارشال

جدول ۱۱- درصد افزایش میزان شاخص مارشال نمونه‌های با افزودنی نسبت به نمونه بدون افزودنی

نمونه	درصد افزایش
M+C1%+F0.3%	۴۶/۸۷
M+C2%+F0.3%	۱۰۴/۸۵
M+C3%+F0.3%	۱۳۸/۹۸
M+C1%+F0.5%	۱۱۶/۸۰
M+C2%+F0.5%	۳۰/۷۵
M+C3%+F0.5%	۹۰/۶۷

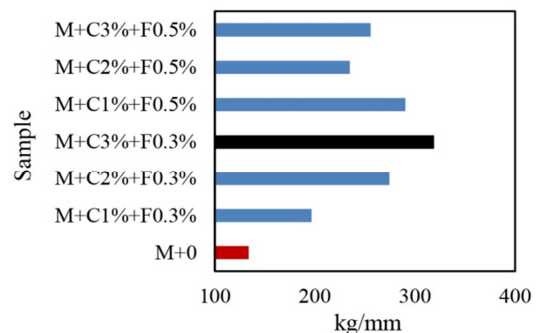
۳-۳- نتایج آزمایش جداسازی نیکلسون

به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب بر چسبندگی سنگدانه‌ها و قیر تحت تأثیر رطوبت، آزمایش نیکلسون، با استاندارد ASTM D-1559، بر روی ترکیبات تهیه شده انجام گردید که نتایج آن در شکل ۱۰، ارائه شده است [۳۷]. همچنین جدول ۱۲، درصد کاهش جداسازی نیکلسون نمونه‌ها را نسبت به نمونه بدون افزودنی نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب، چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد. بهترین نتیجه در نمونه‌های حاوی ۳ درصد سیمان و ۰/۵ درصد الیاف افزودنی مشاهده گردید که می‌تواند تا مقدار ۴۸/۴۳ درصد مقدار جداسازی نیکلسون را کاهش دهد. با توجه به این نتایج، ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب با افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌تواند منجر به بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالت سرد امولسیون‌ی در برابر پدیده عریان‌شدگی گردد.



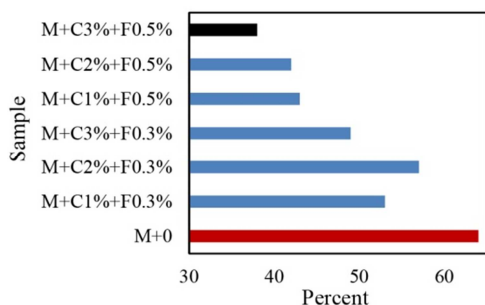
شکل ۱۰- نتایج آزمایش جداسازی نیکلسون

شاخص مارشال از جمله پارامترهایی است که می‌تواند نشانگر مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائمی باشد. با افزایش درصد سیمان، مقدار مقاومت مارشال نمونه‌ها افزایش و میزان روانی کاهش می‌یابد. این تغییرات به نمودار شاخص مارشال منعکس گردیده است. با بررسی نمودار می‌توان ملاحظه نمود که در نمونه‌های حاوی ۳ درصد سیمان و ۰/۳ درصد الیاف حاوی آربوسل‌های چرب به حداکثر میزان خود رسیده است. شکل ۹، مقایسه شاخص مارشال و جدول ۱۱، درصد افزایش میزان شاخص مارشال نمونه‌ها را نسبت به نمونه بدون افزودنی، نشان می‌دهد. بر مبنای شکل ۹ و جدول ۱۱، می‌توان ملاحظه نمود که شاخص مارشال این نمونه‌ها نسبت به نمونه فاقد افزودنی ۱۳۹ درصد افزایش نشان می‌دهد که بسیار چشم‌گیر است.



شکل ۹- نمودار شاخص مارشال نمونه‌ها

افزایش مقدار الیاف منجر به برهم خوردن بافت یکنواخت مخلوط می‌گردد. این امر در حدی است که حتی افزایش درصد سیمان هم نمی‌تواند نقصان به وجود آمده را پوشش دهد و با عنایت به ترکیب چندفازی مخلوط‌های آسفالتی برهم خوردگی بافت مخلوط تأثیر فراوانی در کاهش صلبیت مخلوط از خود نشان می‌دهد. نتایج حاصل با نتایج ارائه شده توسط اوروج و همکاران در استفاده از ترکیب سیمان در مخلوط‌های آسفالتی سرد دارد [۳].



شکل ۱۱- نتایج میزان چسبندگی در مخلوط متراکم نشده تحت تأثیر آب جوشان

جدول ۱۳- درصد کاهش میزان چسبندگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تأثیر آب جوشان در نمونه‌های با افزودنی نسبت به نمونه بدون افزودنی

نمونه	درصد کاهش
M+C1%+F0.3%	-۱۷/۱۸
M+C2%+F0.3%	-۱۰/۹۳
M+C3%+F0.3%	-۲۳/۴۳
M+C1%+F0.5%	-۳۲/۸۱
M+C2%+F0.5%	-۳۴/۳۷
M+C3%+F0.5%	-۴۰/۶۲

۳-۵- تحلیل نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی به روش لاتمن اصلاح شده

برای هر ترکیب ۶ عدد نمونه مارشال تهیه شده، انتخاب و نمونه‌ها به دو گروه تقسیم گردید. گروه اول شامل سه نمونه در حالت خشک تحت آزمون کشش غیرمستقیم و گروه دوم شامل سه نمونه که به مدت ۲۴ ساعت اشباع و تحت آزمون کشش غیرمستقیم قرار گرفت. نتایج این آزمون در شکل ۱۲، ارائه گردیده است. با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که ترکیب سیمان و الیاف نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالت سرد امولسیون را بهبود می‌بخشد، ولی تنها نمونه‌های حاوی ۳ و ۵ درصد سیمان و ۰/۳ و ۰/۵ درصد الیاف توانستند حد ۸۰ درصدی تعیین شده در آیین‌نامه را تأمین نمایند (استاندارد AASHTOO T283). بهترین نتیجه در بین آزمون‌ها مربوط به نمونه‌های شامل ۳ درصد سیمان و ۰/۳ درصد الیاف، با ۲۱/۶۰ درصد می‌باشد. به نظر می‌رسد ترکیب سیمان و الیاف منجر به

جدول ۱۲- درصد کاهش میزان جداسازی نیکلسون نمونه‌های با افزودنی نسبت به نمونه بدون افزودنی

نمونه	درصد کاهش
M+C1%+F0.3%	-۱۲/۵
M+C2%+F0.3%	-۲۶/۵۶
M+C3%+F0.3%	-۳۹/۰۶
M+C1%+F0.5%	-۳۲/۸۱
M+C2%+F0.5%	-۴۲/۱۸
M+C3%+F0.5%	-۴۸/۴۳

۳-۴- تحلیل نتایج آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان نیز، روشی استاندارد (با استاندارد ASTM D-3625) برای تعیین کاهش چسبندگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تأثیر آب جوش است. نتایج این آزمایش در شکل ۱۱، ارائه شده است. آزمایش‌های نیکلسون و آب جوشان از آزمایشات کیفی با درصد خطای بالا می‌باشند؛ ولی با این حال می‌توان با توجه به اینکه نتایج هر دو آزمون همخوانی خوبی باهم دارند؛ تأثیر مثبت ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب در بهبود خاصیت چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها را در مخلوط‌های آسفالتی امولسیونی تهیه شده با استفاده از این آزمایشات مشاهده و با هم مقایسه نمود. نتایج حاکی از بهبود خواص عریان‌شدگی نمونه‌های مورد مطالعه دارد. همچنین کاهش جداسازی قیر از مصالح با افزایش درصد سیمان مشهود است. شکل ۱۱، میزان چسبندگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تأثیر آب جوشان و جدول ۱۳، درصد کاهش چسبندگی در مخلوط متراکم نشده نمونه‌ها را نسبت به نمونه بدون افزودنی نشان می‌دهد.

بررسی نتایج نشان می‌دهد ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربوسل چرب، چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد، بهترین نتیجه در نمونه‌های حاوی ۳ درصد سیمان و ۰/۵ درصد الیاف افزودنی مشاهده گردید که می‌تواند تا مقدار ۴۰/۶۲ درصد مقدار چسبندگی در مخلوط متراکم نشده را کاهش دهد.

توان برابری این مخلوطها می‌گردد. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد میزان ۰/۳ درصد الیاف و ۳ درصد سیمان توان برابری این نوع مخلوط را در حد ضوابط پذیرش مخلوطهای آسفالت گرم معمول افزایش می‌دهد. این موضوع در سایه ایجاد شبکه سه‌بعدی و متراکم ایجاد شده حاصل از استفاده توأم سیمان و الیاف در ترکیب مخلوط حاصل می‌باشد.

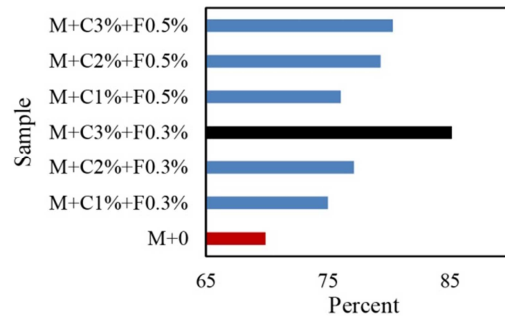
۲- افزودن سیمان و الیاف حاوی آربسول چرب به مخلوط آسفالت سرد امولسیون علاوه بر مزایای زیست محیطی منجر به افزایش شاخص مارشال مخلوط می‌گردد. این امر می‌تواند منجر به بهبود مقاومت مخلوطها در برابر تغییر شکل‌های دائمی گردد.

۳- ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربسول چرب با افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌تواند مقاومت مخلوطهای آسفالت سرد امولسیونی در برابر پدیده عریان‌شدگی بهبود بخشد.

۴- ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربسول چرب با کاهش حجم فضاهای خالی نسبت مقاومت کششی مخلوطهای آسفالت سرد امولسیونی را افزایش می‌دهد نمونه‌های حاوی ۳ و ۵ درصد سیمان و ۰/۳ و ۰/۵ درصد الیاف عملاً رفتاری قابل قبول در برابر خرابی رطوبت از خود نشان می‌دهند.

۵- نتایج آزمون‌های فیزیکی و رطوبتی نشان می‌دهد بهبود این ویژگی‌ها با افزایش درصد الیاف دچار اختلال می‌گردد که علت این امر را در برهم خوردن بافت یکنواخت مخلوط با افزایش میزان الیاف می‌توان جستجو کرد. اهمیت موضوع زمانی واضح تر می‌گردد که افزایش درصد سیمان هم مانع از کاهش تأثیر مازاد الیاف بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمی‌گردد.

کاهش فضاهای خالی مخلوط و افزایش درصد قیر مخلوط می‌گردد که این اوامر باعث افزایش مقاومت مخلوطها در برابر رطوبت می‌گردد. با افزایش درصد الیاف میزان فضای خالی مخلوط مجدداً افزایش می‌یابد که منجر به کاهش مقاومت کششی می‌گردد. از سوی دیگر، الیاف شکل گلوله به خود گرفت که این امر منجر به کاهش مقاومت مخلوطهای اشباع می‌شود. بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد افزودن سیمان و الیاف نقش مؤثری در بهبود مقاومت این نوع مخلوطها در برابر خرابی رطوبتی دارد.



شکل ۱۲- نتایج آزمایش رطوبتی لاتمن

جدول ۱۴- درصد افزایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های با افزودنی نسبت به نمونه بدون افزودنی

درصد افزایش	نمونه
۷/۱۱	M+C1%+F0.3%
۱۰/۲۰	M+C2%+F0.3%
۲۱/۶۰	M+C3%+F0.3%
۸/۶۴	M+C1%+F0.5%
۱۳/۳۰	M+C2%+F0.5%
۱۴/۷۰	M+C3%+F0.5%

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، سعی گردید تا تأثیر ترکیب سیمان و الیاف حاوی آربوسل‌های چرب بر ویژگی‌های رطوبتی و مکانیکی مخلوط آسفالت سرد امولسیونی مورد مطالعه و کنکاش قرار گیرد. نتایج زیر از تحلیل‌های این پژوهش مشاهده شد:

۱- استفاده توأم سیمان و الیاف حاوی آربسول چرب در مخلوطهای آسفالت سرد منجر به افزایش

References

- [1] Khavandi, A.R., Ayen, V., & Ejlali, B. (2014). Investigation on Preparation and Performance of Clay-Stabilized Asphalt Emulsions in Iran. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 5(3), 303-316. **doi: 20.1001.1.20086598.1393.5.3.1.7** [In Persian]
- [2] Martin, J. S., Cooley Jr, L. A., & Hainin, M. R. (2003). Production and construction issues for moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements. In *Transportation Research Board National Seminar. San Diego, California*, 209-222.
- [3] Oruc, S., Celik, F., & Akpinar, M. V. (2007). Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures. *Journal of materials engineering and performance*, 16, 578-583. **doi: 10.1007/s11665-007-9095-2**
- [4] Xiong, F., Zarei, M., Tabasi, E., Naseri, A., Khordehbinan, M. W., & Kh, T. I. (2023). Effect of nano-reduced graphene oxide (NRGO) on long-term fracture behavior of Warm Mix Asphalt (WMA). *Construction and Building Materials*, 392, 131934. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131934**
- [5] Van Gorkum, F., Lubbers, H. E., Priston, R. A. G., & Roos, H. (1993). Exposure to pac in bituminous road construction. *The European Association of Bitumen Producers, Sweden*, 430-436.
- [6] Khweir, K., Windmill, A., & Fordyce, D. (1995). The Potential of Stone Filled Emulsions Asphalt. *The European Association of Bitumen Producers, Sweden*, 681-685.
- [7] Dibaj, S., & Kavousi, A. (2012). An optimized mix design method for emulsified bituminous mixtures. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 4(1), 23-34. **doi: 20.1001.1.20086598.1391.4.1.3.4** [In Persian]
- [8] Bayat, R., & Taherkhani, H. (2016). Application of Polypropylene Fiber on the Rutting and Tensile Strength of Binder Layer of Flexible Pavement based on Complex Procedure. *Petroleum Research*, 26(95), 143-154. **doi: 10.22078/pr.2016.621** [In Persian]
- [9] Ameri, M., Mohammadi, M. H., Motevalizadeh, S. M., & Mousavi, A. (2019). Experimental study to investigate the performance of cold in-place recycling asphalt mixes. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 172(6), 360-370. **doi: 10.1680/jtran.17.00062**
- [10] Zarei, M., Salehikalam, A., Tabasi, E., Naseri, A., Khordehbinan, M. W., & Negahban, M. (2022). Pure mode I fracture resistance of hot mix asphalt (HMA) containing nano-SiO₂ under freeze-thaw damage (FTD). *Construction and Building Materials*, 351, 128757. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128757**
- [11] Zarei, M., Kordani, A. A., Naseri, A., Khordehbinan, M. W., Khajehzadeh, M., & Zahedi, M. (2022). Evaluation of fracture behaviour of modified warm mix asphalt containing vertical and angular cracks under freeze-thaw damage. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-7. **doi: 10.1080/10298436.2022.2072500**
- [12] Schmidt, R. J., Santucci, L. E., & Coyne, L. D. (1973). Performance characteristics of cement modified asphalt emulsion mixes. *Proc of the AAPT*, 42, 300-319.
- [13] Akbari Baghal, A. E., Maleki, A., & Vafaei, R. (2021). On the Pull-Out Behavior of Hooked-End Shape Memory Alloys Fibers Embedded in Ultra-High Performance Concrete. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 11(4), 265-77. **doi:10.46604/ijeti.2021.7060**
- [14] Xiao, J., Jiang, W., Ye, W., Shan, J., & Wang, Z. (2019). Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 220, 577-586. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.051**
- [15] Li, R., Leng, Z., Wang, Y., & Zou, F. (2020). Characterization and correlation analysis of mechanical properties and electrical resistance of asphalt emulsion cold-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 263, 119974. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119974**
- [16] Tjaronge, M. W., Irmawaty, R., & Hustim, M. (2020). Effect of buton granular asphalt gradation and cement as filler on performance of cold mix asphalt using limestone aggregate. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(1), 419-433. **doi: 10.1088/1755-1315/419/1/012028**
- [17] Dardak, H. (1993). Performance of different mixes of sand emulsion in Indonesia. *1st Congress on Emulsion, Paris*, 4-12.
- [18] Guo, M., Tan, Y., & Zhou, S. (2014). Multiscale test research on interfacial adhesion property of cold mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 68, 769-776. **doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.031**
- [19] Makarchian, M., Karimi, A., & Moghadas Nejad, F. (2016). Evaluation of the Effects of Fiber and Aggregate Type on Mechanical Characteristics of Stone Mastic Asphalt (SMA) and its Comparison Hot Mix Asphalt (HMA). *Journal of Transportation Research*, 12(4), 375-386. [In Persian]
- [20] Dong, Q., Yuan, J., Chen, X., & Ma, X. (2018). Reduction of moisture susceptibility of cold asphalt mixture with Portland cement and bentonite Nano-clay additives. *Journal of Cleaner Production*, 176, 320-328, **doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.163**
- [21] Wang, Y., Leng, Z., Li, X., & Hu, C. (2018). Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1031-1038. **doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.132**

- [22] Sun, Z., Li, Y., Zhang, J., & He, S. (2019). Preparation and performance evaluation of cold mix asphaltic liquid. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(1), 245-250. doi:10.1166/jnn.2019.16464
- [23] Zarei, M., Taghizadeh, M. R., Moayedi, S. S., Naseri, A., Al-Bahrani, M., & Khordehbinan, M. W. (2022). Evaluation of fracture behavior of Warm mix asphalt (WMA) modified with hospital waste pyrolysis carbon black (HWPCB) under freeze-thaw damage (FTD) at low and intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*, 356, 129184. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129184
- [24] Golchin, B., Hamzah, M. O., & Hasan, M. R. M. (2017). Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. *Construction and Building Materials*, 141, 578-588. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.123
- [25] Tabasi, E., Zarei, M., Mobasheri, Z., Naseri, A., Ghafourian, H., & Khordehbinan, M. W. (2023). Pre-and post-cracking behavior of asphalt mixtures under modes I and III at low and intermediate temperatures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 124, 103826. doi: 10.1016/j.tafmec.2023.103826
- [26] Saedi, S., & ORUÇ, Ş. (2020). The effects of nano bentonite and fatty arbolcel on improving the behavior of warm mixture asphalt against moisture damage and rutting. *Civil Engineering Journal-Tehran*, 6(5), 877-888. doi: 10.28991/cej-2020-03091514
- [27] ASTM C127-1. (2004). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. American Society for Testing and Materials.
- [28] ASTM C128-15. (2004). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*. American Society for Testing and Materials.
- [29] ASTM C131, M-14. (2003). *Standard test method for resistance to degradation of small - size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine*. American Society for Testing and Materials.
- [30] ASTM D4791. (2005). *Standard test method for flat particles elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate*. American Society for Testing and Materials.
- [31] Soufian Cement Laboratory. (2020). *Portland Cement Type II Testing Result Reports*, <https://soufiancement.com/wp-content/uploads/2021/01/SCCCementAnalysis23Feb.2020TII.pdf>
- [32] ASTM D244-09. (2009). *Standard test methods and practices for emulsified asphalts*. American Society for Testing and Materials.
- [33] Sengul, C. E. (2010). Effects of SBS and Fiber Type Additives on the Performance of SMA Compared with Lime. *PhD Thesis*, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- [34] ASTM D3625. (1991). *Boiling test of Bituminous mixtures*. American Society for Testing and Materials.
- [35] Akbulut, H., Gürer, C., Çetin, S., & Doğan, H. (2014). The effects of different dusty aggregate on bituminous hot mixtures. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(1), 69-78. doi: 10.1515/secm-2013-0011
- [36] ASTM D2710-09. (2013). *Standard test method for bromine index of petroleum hydrocarbons by electro-metric titration*. American Society for Testing and Materials.
- [37] ASTM D1559. (1983). *Resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus*. American Society for Testing Materials.