پژوهش‌های کاربردی در مهندسی زیرساخت‌ها

سال یکم، شماره یکم، پیاپی یکم، بهار و تابستان ۱۴۰۵ (۱۳-۲۴)

«مقاله پژوهشی»

ارزیابی خواص عملکردی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی اصلاح‌شده با پلیمر لاتکس

محمدعلی زیاری[۱]، سید محمدضیاء علوی[۲]، مسعود پلاسی[۳]، مهدی زال‌نژاد[۴]

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:
مسعود پلاسی
رایانامه: mpalas@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

استناد به این مقاله:
زیاری، محمدعلی؛ علوی، سید محمدضیاء؛ پلاسی، مسعود؛ زال‌نژاد، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی خواص عملکردی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی اصلاح‌شده با پلیمر لاتکس. *پژوهش‌های کاربردی در مهندسی زیرساخت‌ها*، ۱(۱)، ۱۳-۲۴.

چکیده

آسفالت سرد بازیافتی به‌دلیل کاهش هزینه‌های انرژی، مدیریت پسماند و تأثیرات زیست‌محیطی مثبت، جایگاه ویژه‌ای در پروژه‌های راهسازی یافته است. با این حال، استفاده از تراشه آسفالتی بازیافتی می‌تواند خواص مکانیکی مخلوط را تحت‌تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، تأثیر درصدهای مختلف تراشه آسفالتی (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) و اصلاح قیر امولسیون با پلیمر لاتکس (SBR latex) بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد بررسی شده است. نمونه‌ها با استفاده از روش مارشال اصلاح شده، با محدوده بهینه درصد هوا (۹-۱۴ درصد) و قیر امولسیون (۳/۵-۵/۵ درصد) تهیه شدند. سپس آزمایش‌های شامل مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیکی انجام شد و تحلیل آماری ANOVA به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای مستقل و تعامل آن‌ها به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد افزایش درصد تراشه آسفالتی منجر به کاهش مقاومت مارشال (تا ۲۴ درصد)، مدول برجهندگی (تا ۷۶ درصد) و مقاومت خزشی (تا ۸۱ درصد) می‌شود، اما حساسیت رطوبتی و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها به‌ترتیب به‌میزان ۱۳ و ۱۵ درصد بهبود می‌یابد. استفاده از پلیمر لاتکس توانست تا حدی افت عملکرد ناشی از تراشه آسفالتی را جبران کرده و خواص مکانیکی مانند مقاومت مارشال را بهبود بخشد. با این حال، در درصدهای بالای تراشه، تأثیر آن محدود بوده و به‌طور کامل جبران نمی‌شوند. این پژوهش نشان داد که ترکیب تراشه آسفالتی با پلیمر لاتکس، با بهینه‌سازی درصد تراشه و میزان اصلاح‌کننده، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی در پروژه‌های راهسازی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی

آسفالت سرد بازیافتی، پلیمر لاتکس، حساسیت رطوبتی، خواص عملکردی.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۴ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

سنگدانه‌ها مهم‌ترین جزء مخلوط‌های آسفالتی هستند که ۹۰ تا ۹۵ درصد وزن آن را تشکیل می‌دهند و وظیفه انتقال بار ترافیکی به لایه‌های زیرین را برعهده دارند [۱]. استخراج سنگدانه‌های طبیعی باعث مشکلاتی مانند جنگل‌زدایی، ازبین‌رفتن چشم‌انداز طبیعی و تولید گردوغبار می‌شوند. همچنین کمبود سنگدانه‌های باکیفیت و محدودیت معادن، موجب افزایش هزینه پروژه‌های بزرگراهی شده است [۲]. با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و لزوم حرکت به سمت توسعه پایدار و همچنین مصرف گسترده سنگدانه‌های طبیعی در ساخت جاده‌ها که به بخشی اجتناب‌ناپذیر از ساخت بزرگراه‌ها تبدیل شده است، استفاده از مصالح بازیافتی، در صنعت روسازی موردتوجه قرار گرفته است [۳]. در این میان، تراشه آسفالت (RAP[1]) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح جایگزین، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف منابع طبیعی و حفظ محیط‌زیست داشته باشد [۴]. استفاده از تراشه در مخلوط‌های آسفالتی سرد، علاوه‌بر کاهش هزینه‌های تولید و اجرا، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود [۵].

طبق آمار انجمن آسفالت اروپا، سالانه حدود ۵۰ میلیون تن تراشه آسفالتی در اروپا و بیش از ۱۰۰ میلیون تن در ایالات متحده تولید می‌شود [۶]. استفاده از تراشه آسفالتی علاوه‌بر مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، می‌تواند چالش‌هایی نظیر کاهش چسبندگی و افزایش حساسیت رطوبتی را به‌همراه داشته باشد [۷] . این مشکلات عمدتاً به‌دلیل سخت‌شدن قیر موجود در تراشه آسفالتی و کاهش خاصیت چسبندگی آن است. در این‌خصوص راهکارهای متعددی توسط محققان ارائه‌شده که اصلاح قیر امولسیون با پلیمر لاتکس (SBR[2] latex) یکی از راهکارهای مؤثر می‌باشد. استفاده از این نوع پلیمر موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالت بازیافتی می‌شود [۸]. پلیمر لاتکس با افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها و همچنین بهبود خواص ویسکوالاستیک قیر، می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالتی را در برابر ترک‌خوردگی، شیارشدگی و خستگی بهبود بخشد [۹]. تحقیقات پیشین نشان داده است که مخلوط‌های آسفالتی سرد حاوی تراشه آسفالت می‌توانند با رعایت نسبت‌های بهینه مواد و استفاده از افزودنی‌های مناسب، عملکرد مطلوبی ارائه دهند. جیم و همکاران (۲۰۲۴)، عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی (CIR[3]) تحت شرایط یخ‌زدگی و ذوب را مورد بررسی قرار دادند و تأثیر این شرایط را بر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و شیارشدگی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب باعث کاهش مدول دینامیکی و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی شده است [۱۰]. فلورس و همکاران (۲۰۱۹)، عملکرد ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی در آسفالت سرد را از طریق آزمایش‌های مقاومت کششی، مدول سختی کششی غیرمستقیم (ITSM[4]) و عمر خستگی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که مقدار ITSM به‌میزان ۱۰۰ درصد افزایش‌یافته و مقاومت در برابر خستگی با ۲ درصد سیمان بهبود یافته است [۱۱] در مقابل، در تحقیقی از جیانگ و همکاران (۲۰۲۰)، در رابطه با رفتار ترک‌خوردگی دریافتند که مخلوط‌هایی که حاوی ۴۰ درصد تراشه آسفالتی هستند، عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی دارند[۱۲] . راشیا و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر مقدار ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت از دو منبع مختلف (حداکثر اندازه دانه‌های سنگی ۱۶ و ۱۰ میلی‌متر) بر خواص آسفالت سرد را با استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمایش خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB[5]) مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که اندازه بزرگ‌تر دانه‌های تراشه آسفالتی منجر به کاهش مقاومت کششی و انرژی شکست می‌شود [۱۳] .

تحقیقات پیشین نشان می‌دهند که استفاده از تراشه آسفالت در آسفالت سرد دارای مزایا و چالش‌هایی است. تفاوت نتایج مطالعات نویسندگان مختلف در استفاده از تراشه آسفالت نیاز به تحقیقات بیشتر و تنظیم دقیق نسبت‌های مخلوط را برجسته می‌کند. همچنین، استفاده از امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر لاتکس می‌تواند راه‌حلی برای بهبود خواص مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت باشد. این خلأهای تحقیقاتی می‌توانند جهت‌گیری‌های مناسبی برای آزمایش‌های آتی فراهم آورند. اگرچه تأثیر تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی گرم به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، اما تحقیقات محدودی در زمینه استفاده هم‌زمان از تراشه آسفالت و قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر لاتکس در مخلوط‌های آسفالتی سرد انجام شده است. در این راستا، تأثیر درصدهای مختلف تراشه آسفالت (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) و اصلاح قیر امولسیون با پلیمر لاتکس بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد مورد بررسی قرار

1. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
2. Styrene-Butadiene Rubber
3. Cold-in-place recycling
4. Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)
5. Semi-Circular Bending

گرفته است. به منظور ارزیابی جامع عملکرد این مخلوط‌ها، آزمایش‌های مختلفی از جمله مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم[6]، مدول برجهندگی[7]، حساسیت رطوبتی، خزش و تحلیل آماری جهت بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر وابسته و شناخت پارامترهای تأثیرگذار انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهکارهای مؤثری برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد حاوی تراشه آسفالت و افزایش کاربرد آن‌ها در پروژه‌های راهسازی ارائه دهد.

روش‌شناسی پژوهش

مواد و مصالح: در این پژوهش سنگ‌دانه‌های سیلیسی از معدن شرکت هادپی و تراشه آسفالتی از دپوی تراشه آسفالتی واقع در پاکدشت مطابق استاندارد ASTM C702 تهیه شده است. آزمایش تجزیه مطابق استاندارد ASTM D2172 جهت به‌دست‌آوردن درصد قیر تراشه آسفالت انجام‌شده است. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه برای تراشه آسفالتی، ۱۲/۵ میلی‌متر و درصد قیر تراشه آسفالت برابر ۵/۳ درصد به‌دست آمد. درجه نفوذ و میزان نقطه نرمی قیر پیر شده استخراج شده از تراشه آسفالتی به‌ترتیب ۲۸/۷ (۰٫۱ میلی‌متر) و ۶۷/۱ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها مطابق جدول ۱ براساس دستورالعمل MS-21 است. در این مطالعه، سیمان پرتلند نوع II (سیمان فیروزکوه) به مقدار ۱ درصد در مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین خصوصیات سنگ‌دانه‌ها در جدول ۲ نشان‌داده شده است. قیر امولسیون مورد استفاده در این پژوهش از نوع کاتیونی مطابق مشخصات جدول ۳ استفاده گردید. جهت اصلاح قیر امولسیون از پلیمر لاتکس (SBR latex) با نام اختصاری Polylatex C ساخت کشور اسپانیا با چگالی ۰/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دارای ۶۳ درصد پایه جامد پلیمری به روش پس اختلاط به‌میزان ۳ درصد براساس وزن جامد قیر استفاده شد.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح مخلوط‌های آسفالتی

اندازه الک، میلی‌متر	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳	۰/۰۷۵
عبوری، درصد	۱۰۰	۹۱	۷۳	۵۴	۲۶	۱۰	۵
محدوده عبوری، درصد	۱۰۰	۹۵-۸۵	۸۰-۵۵	۶۰-۴۰	۴۵-۲۲	۲۰-۸	۱۲-۰

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایش‌ها	استاندارد	درشت‌دانه
وزن مخصوص درشت‌دانه، gr/cm^3	ASTM C127	۲/۵۳
وزن مخصوص ریزدانه، gr/cm^3	ASTM C128	۲/۶۵
ارزش ماسه‌ای، درصد	ASTM D2419	۶۹
شکستگی در دو وجه، درصد	ASTM D5821	۹۲
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس، درصد	ASTM C131	۱۶

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیونی کاتیونی پلیمری

آزمون‌ها	استاندارد آزمون	نتیجه
کندروانی سی بولت-فیورل در دمای ۲۵°c، ثانیه	AASHTO T59	۲۶
الک، درصد	ASTM D244	۰/۰۴
اندود، درصد	AASHTO T59	۱۰۰
آزمون پایداری ذخیره‌سازی (انبارش)، ۲۴ ساعت، درصد	ASTM D6930	۰/۶
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی درصد	ASTM D7497	۶۳
درجه نفوذ در ۲۵°c، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۱
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، °c	ASTM D36	۶۵

ساخت نمونه و آزمایش‌ها

چندین روش برای تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون و آب در آسفالت سرد بازیافتی استفاده شده است [۱۴، ۱۵]. در این پژوهش، از روش مارشال اصلاح شده برای آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها مطابق شکل ۱ استفاده شد. در این روش، محدوده بهینه درصد هوا بین ۹ تا ۱۴ درصد تعیین شده است. علاوه‌بر معیار درصد هوا، درصد قیر و میزان رطوبت بهینه نیز براساس بیشینه پایداری مارشال و چگالی حجمی مشخص شده است. در مرحله اول، مخلوط‌ها با میزان آب کل ۲/۵ درصد (شامل آب موجود در قیر امولسیون، رطوبت سنگدانه و آب اضافه شده) آماده شد. سپس قیر امولسیون در مقادیر مختلف بین ۳/۵ تا ۵/۵ درصد با افزایش‌های ۰/۵ درصد به نمونه‌ها اضافه شد. فرایند تراکم نمونه‌ها با اعمال ۵۰ ضربه چکش استاندارد مارشال در هر طرف انجام گرفت. پس از تراکم، نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد در گرمخانه عمل‌آوری شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط نگهداری شدند تا به شرایط پایدار برسند [۱۶] . مطابق با طرح اختلاط، مقدار قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰

6. Indirect Tensile Strength Test
7. Resilient Modulus

درصد تراشه به‌ترتیب ۵/۱، ۴/۹، ۴/۶، ۴/۴ و ۴/۱ تعیین شد. همچنین میزان آب کل در همه نمونه‌ها ۲/۵ درصد در نظر گرفته شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، تمامی داده‌های عددی از میانگین سه مقدار اندازه‌گیری شده به‌دست آمد، به طوری که ضریب تغییرات آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد بود. در جدول ۴ نمادها و ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای دستیابی به دانه‌بندی مطلوب، همه نمونه‌ها شامل ۵ درصد فیلر مصالحی سنگی می‌باشند. لذا در نمونه‌های R100 و R100+S نیز، ۵ درصد فیلر سنگدانه اضافه شد. درنتیجه، در نمونه‌های R100 و R100+S از ۹۵ درصد تراشه آسفالت استفاده شده است. به‌عبارت دیگر در همه ترکیب‌ها، مقدار فیلر مصالح سنگی و سیمان برای ارزیابی اثر تراشه آسفالت و پلیمر، به‌میزان ثابت در نظر گرفته شد. این رویکرد باعث اصلاح توزیع اندازه ذرات و دستیابی به دانه‌بندی مناسب برای مخلوط آسفالتی نهایی در این ترکیب‌ها شده است.



شکل ۱. نمونه‌های ساخته شده به روش مارشال اصلاح شده

جدول ٤. نمادها و ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی

ردیف	نماد مخلوط	ترکیب مخلوط آسفالتی
۱	A	نمونه شاهد
۲	A+S	نمونه شاهد + پلیمر لاتکس
۳	R25	نمونه حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت
۴	R25+S	نمونه حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت + پلیمر لاتکس
۵	R50	نمونه حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت
۶	R50+S	نمونه حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت + پلیمر لاتکس
۷	R75	نمونه حاوی ۷۵ درصد تراشه آسفالت
۸	R75+S	نمونه حاوی ۷۵ درصد تراشه آسفالت + پلیمر لاتکس
۹	R100	نمونه حاوی ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت
۱۰	R100+S	نمونه حاوی ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت + پلیمر لاتکس

آزمایش مقاومت مارشال

به‌منظور ارزیابی مقاومت مارشال، نمونه‌ها طبق استاندارد مارشال ساخته شدند. برای هرگروه از آزمایش‌ها، سه نمونه مشابه با قطر ۱۰۱٫۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱٫۳ ± ۶۳٫۵ میلی‌متر ساخته شد [۱۷] . بارگذاری نمونه با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه اعمال می‌شود تا زمانی که بار به حداکثر مقدار خود برسد[۱۸]. این آزمایش در دمای محیط و در ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در این پژوهش، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با توجه به استاندارد ASTM D6931، در شرایط دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و همچنین نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای محاسبه مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، از رابطه‌ای که در معادله (۱) آورده شده است، استفاده گردید. در این معادله، S_t نشان‌دهنده مقاومت کششی غیرمستقیم است که برحسب مگاپاسکال، P معرف حداکثر نیروی اعمال‌شده بر نمونه بوده و برحسب نیوتن، t بیانگر ضخامت نمونه و D قطر نمونه و هر دو برحسب میلی‌متر می‌باشند [۱۹].

$$S_t = \frac{2 \times P}{\pi \times t \times D} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

آزمایش حساسیت رطوبتی

در این پژوهش، نحوه انجام آزمایش و محاسبه نرخ حساسیت رطوبتی بر اساس استاندارد AASHTO T283 انجام شد [۲۰] . در این مطالعه، سه نمونه آسفالتی به‌عنوان نمونه‌های شاهد (خشک) و سه نمونه دیگر تحت شرایط رطوبتی مورد آزمایش قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد با نرخ بارگذاری یکنواخت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه تحت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم قرار گرفتند. به‌منظور مقایسه نتایج، مقاومت کششی غیرمستقیم به‌دست‌آمده از نمونه‌های خشک با نمونه‌های قرارگرفته در شرایط مرطوب با استفاده از شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR[۸]) که در رابطه ۲ ارائه شده است، محاسبه شد. در این رابطه، TSR برحسب درصد، S_1 میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک و S_2 میانگین مقاومت

8. Tensile Strength Ratio

کششی نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی است و هر دو برحسب مگاپاسکال می‌باشند.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

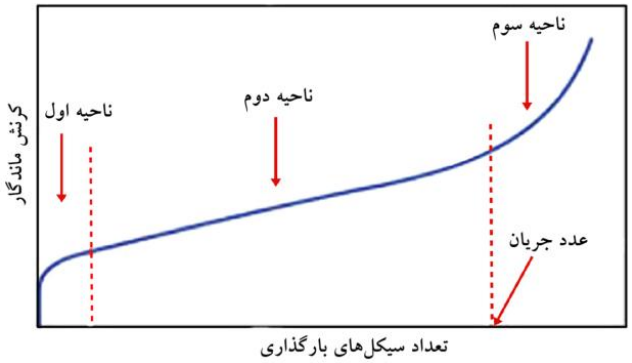
آزمایش مدول بر جهندگی

آزمایش مدول برجهندگی (M_R) مطابق با استاندارد ASTM D4123، بار هاورساین در فرکانس ۱ هرتز و دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد به نمونه‌ها اعمال شد [21]. M_R از رابطه ۳ قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه، M_R مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال، P حداکثر بار اعمالی بر حسب نیوتن، υ ضریب پواسون، t ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر و H تغییر شکل برگشت‌پذیر نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

$$M_R = \frac{P(\upsilon + 0.27)}{tH} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی به منظور تعیین تعداد سیکل‌های بارگذاری متناظر با حداقل نرخ تغییرشکل کرنش‌محوری دائمی در طول آزمایش بارگذاری مکرر انجام شده است. نمونه تحت بار فشاری محوری هاورساین مکرر با پالس ۰/۱ ثانیه در هر ۱ ثانیه قرار می‌گیرد [۲۲]. دمای این آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد و میزان بار وارده برابر با ۲۰۰ کیلوپاسکال لحاظ شده است. عدد جریان (FN[9]) یکی از خروجی‌های کلیدی این آزمایش است که نشان‌دهنده تعداد چرخه‌های بارگذاری مرتبط با حداقل نرخ تغییر کرنش‌محوری دائمی در طول آزمایش بارگذاری تکراری می‌باشد [۲۳]. این شاخص به‌عنوان معیاری مهم برای تحلیل خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی به ویژه در زمینه پایداری در برابر تغییر شکل دائمی، رفتار تحت بارگذاری مکرر و ارزیابی عمر خدمت‌دهی مخلوط مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه اصلی آزمون خزش دینامیکی، رابطه بین کرنش ماندگار در تعداد سیکل‌های بارگذاری شده می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. عدد جریان به‌عنوان تعداد سیکل‌های بارگذاری که در آن جریان سوم آغاز می‌شود، تعریف می‌گردد. آزمون خزش یکی از بهترین روش‌ها برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی محسوب می‌شود [۲۴].



شکل ۲. تغییرشکل دائمی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری

یافته‌ها

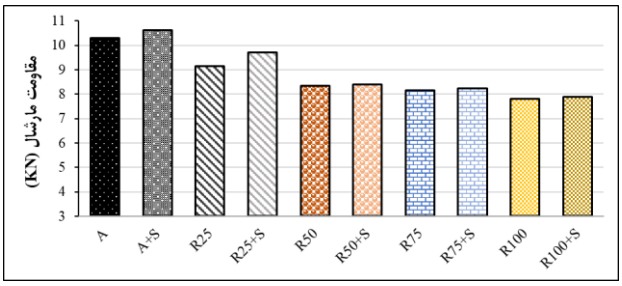
نتایج آزمایش مقاومت مارشال

شکل ۳ نشان‌دهنده نتایج آزمایش مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالتی است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد نمونه شاهد (A) دارای مقاومت مارشال حدود ۱۰/۳ کیلو نیوتن است. پس از افزودن پلیمر لاتکس به نمونه شاهد، افزایش اندکی در مقاومت مارشال مشاهده می‌شود که این افزایش بهبود چسبندگی قیر را نشان می‌دهد. با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط‌های R25، R50، R75 و R100، مقاومت مارشال به ترتیب ۱۱/۳، ۱۸/۹، ۲۰/۹ و ۲۴/۲ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش به‌دلیل کاهش خواص چسبندگی و کیفیت قیر ناشی از حضور مصالح قدیمی در تراشه آسفالت است. تراشه آسفالت، به‌دلیل استفاده مجدد از مواد قدیمی و یا آسیب‌دیده، می‌تواند باعث کاهش خواص مکانیکی مخلوط‌ها گردد.

افزودن پلیمر لاتکس به مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت باعث بهبود مقاومت مارشال نسبت به نمونه‌های مشابه بدون پلیمر لاتکس می‌شود. این بهبود به‌دلیل افزایش چسبندگی قیر مخلوط است. به‌عنوان مثال، نمونه R50+S که شامل ۵۰ درصد تراشه آسفالت و پلیمر لاتکس است، مقاومت بالاتری نسبت به نمونه R50 دارد. این نشان‌دهنده توانایی پلیمر لاتکس در جبران بخشی از افت کیفیت ناشی از حضور تراشه آسفالت می‌باشد. افزودن پلیمر لاتکس باعث می‌شود که قیر بتواند خواص چسبندگی خود را حتی در حضور مواد بازیافتی حفظ کند. با افزودن پلیمر لاتکس به مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت، کاهش مقاومت تا حدودی جبران شده، اما این بهبود به‌طور کامل قادر به برگرداندن مقاومت به سطح نمونه‌های شاهد نیست. با مقایسه کلی بین نمونه‌های دارای تراشه آسفالت و نمونه‌های دارای تراشه

9. Flow Number

آسفالت به‌همراه پلیمر لاتکس، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن پلیمر لاتکس به مخلوط‌های بازیافتی منجر به بهبود اندکی در مقاومت مارشال می‌شود. این بهبود را می‌توان به بهبود چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها، بهبود خاصیت کششی و انعطاف‌پذیری قیر نسبت داد. افزایش درصد تراشه آسفالتی موجب کاهش مقاومت مارشال می‌شود، زیرا قیر پیر شده موجود در تراشه دارای سختی بیشتر و چسبندگی کمتر است و نمی‌تواند مانند قیر تازه پیوند مناسبی میان سنگدانه‌ها ایجاد کند. همچنین حضور مصالح قدیمی با سطح تماس ضعیف‌تر، تداوم ساختار مقاوم مخلوط را کاهش داده و افت پایداری مارشال را تشدید می‌کند. پلیمر لاتکس با ایجاد شبکه پلیمری در قیر و افزایش چسبندگی، بخشی از این ضعف ساختاری را جبران می‌کند

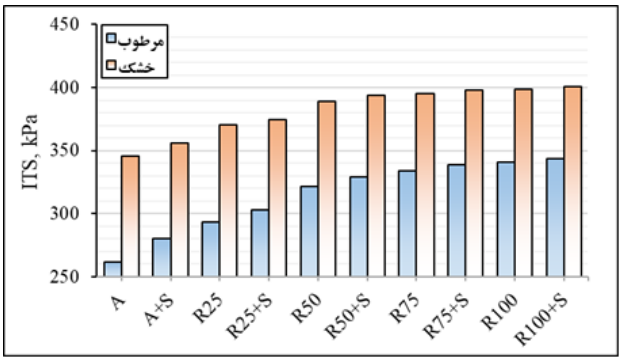


شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت مارشال

نتایج حساسیت رطوبتی

شکل ۴ نشان‌دهنده نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک و مرطوب است. با توجه به نتایج، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه A، ۳۴۵/۸ کیلوپاسکال است. نمونه A+S که شامل پلیمر لاتکس می‌باشد، نشان می‌دهد که افزودن این پلیمر به مخلوط‌های آسفالتی سرد منجر به افزایش اندک مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود. با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط‌های R25، R50، R75 و R100 افزایش تدریجی در مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها مشاهده می‌شود که به‌ترتیب برابر با ۳۷۰/۴، ۳۸۸/۸، ۳۹۵/۴ و ۳۹۸/۷ کیلوپاسکال می‌باشد. دلیل این روند افزایشی را می‌توان به ماهیت آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم و ویژگی‌های تراشه آسفالت نسبت داد. قیر پیر و سخت‌شده موجود در تراشه آسفالت، به‌همراه قفل‌وبست سنگدانه‌ها، یک اسکلت دانه‌ای صلب‌تری ایجاد می‌کند. این ساختار صلب، در شرایط بارگذاری سریع آزمون ITS (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد)، مقاومت بالایی در برابر تنش کششی حداکثر از خود نشان می‌دهد. درنتیجه با افزایش ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به نمونه شاهد ۱۵/۲ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از استفاده مجدد از مصالح بازیافتی می‌باشد و نشان می‌دهد حضور تراشه آسفالت باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی سرد می‌شود. این افزایش مقاومت در افزودن تراشه آسفالت، به ویژه در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت کم‌تر، مشهودتر است؛ به این معنا که افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم از نمونه A به R25 حدود ۷ درصد است درحالی‌که در نمونه R75 به R100 کمتر از ۱ درصد می‌باشد.

با افزودن پلیمر لاتکس به نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت مشاهده می‌شود که مقاومت کششی غیرمستقیم این مخلوط‌ها به میزان بیشتری نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است. به‌عنوان مثال، نمونه R25+S، مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه R25 دارد و بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه R100+S مشاهده می‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب تراشه آسفالت با پلیمر لاتکس باعث بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود.

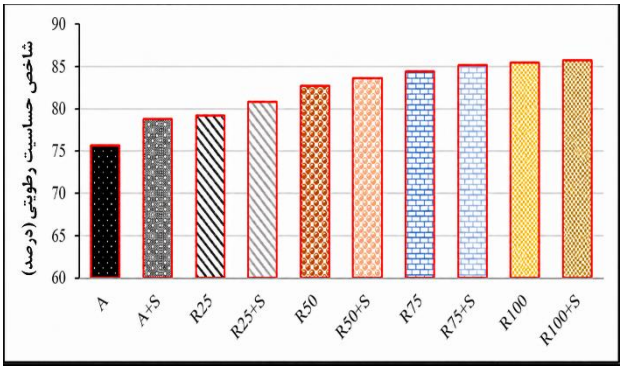


شکل ٤. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در شکل ۵ مشاهده می‌شود شاخص TSR برای نمونه A، ۷۵٫۷ درصد است. افزودن پلیمر لاتکس به نمونه شاهد (A+S) باعث افزایش ۴ درصدی مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی می‌شود و به ۷۸٫۸ درصد می‌رساند. مشاهده می‌شود که شاخص TSR به‌طور پیوسته با افزایش درصد تراشه آسفالت در نمونه‌های بازیافتی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، نمونه‌های R25، R50، R75 و R100 نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب به‌میزان ۴/۷، ۹/۳، ۱۱/۵ و ۱۲/۹ درصد مقادیر TSR بالاتری دارند. این موضوع این‌طور توجیه می‌شود که قیر پیر شده در نمونه‌های حاوی تراشه به‌دلیل افزایش سختی و اندودشدن سنگدانه توسط آن، نفوذ آب به داخل مخلوط آسفالتی را می‌تواند کاهش داده که این امر به نوبه خود موجب

کاهش حساسیت رطوبتی می‌شود. علاوه‌بر این، ماهیت آب‌گریز این لایه قیر پیرشده، به مثابه یک پوشش محافظ عمل‌کرده و از فصل مشترک سنگدانه و قیر در برابر نفوذ رطوبت و پدیده عریان‌شدگی محافظت بیشتری به عمل می‌آورد.

افزودن پلیمر لاتکس در ترکیب با تراشه آسفالت نیز، باعث ارتقا شاخص TSR می‌شود. ترکیب پلیمر لاتکس با تراشه آسفالت در نمونه‌های R25+S، R50+S، R75+S و R100+S به‌طور مؤثرتری باعث افزایش مقاومت در برابر رطوبت و افزایش شاخص TSR شده است. نتایج به‌طور کلی نشان می‌دهد که استفاده از تراشه آسفالت و اصلاح آن با پلیمر لاتکس می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای کاهش حساسیت رطوبتی و افزایش پایداری مخلوط‌های آسفالتی سرد مورد استفاده قرار گیرد. به‌دلیل افزایش چسبندگی و تقویت پیوندهای درون ساختار مخلوط، نمونه‌های حاوی پلیمر لاتکس و تراشه آسفالت از دوام بیشتری برخوردار بوده و می‌توانند برای استفاده در مناطقی که در معرض رطوبت بالا هستند، مناسب باشند.

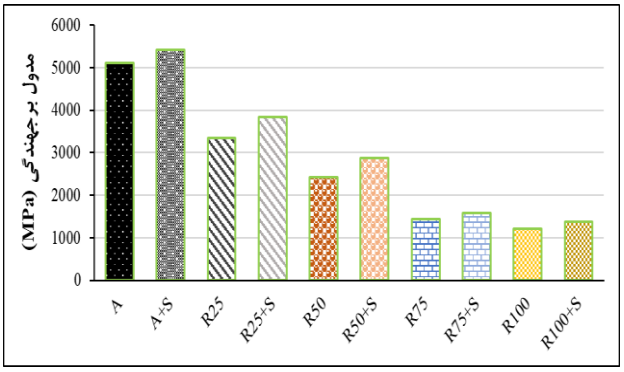


شکل ۵. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۶، در نمونه شاهد (A)، شاخص مدول برجهندگی (MR)، برابر ۵۱۱۳ مگاپاسکال به‌دست آمده است که بیانگر مقاومت و سختی مناسب مخلوط اولیه می‌باشد. با افزودن پلیمر لاتکس به نمونه شاهد، شاخص MR برای نمونه (A+S)، ۵۴۲۰ مگاپاسکال به‌دست آمده است، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این افزودنی در بهبود خواص ارتجاعی و بازگشت‌پذیری مخلوط آسفالتی سرد می‌باشد.

با افزودن تراشه آسفالتی به ترکیب، مشاهده می‌شود که مدول برجهندگی به نسبت بالایی، کاهش می‌یابد که این موضوع به وضوح در نمونه‌های R25، R50، R75 و R100 نمایان است. به‌عنوان مثال در نمونه R100، ۷۶ درصد افت شاخص MR نسبت به نمونه A حاصل می‌شود. کاهش MR با افزایش درصد تراشه می‌تواند به دلیل کاهش پیوستگی و هم‌بستگی مصالح در مخلوط باشد که ناشی از حضور مصالح بازیافتی و تفاوت‌های ساختاری بین سنگدانه‌های جدید و تراشه‌های آسفالت قدیمی است. این تغییرات نشان می‌دهد که حضور تراشه‌ها، به ویژه در درصدهای بالا، موجب کاهش توانایی بازگشت‌پذیری مخلوط آسفالتی در بارگذاری می‌شود. در نمونه‌های R25+S، R50+S، R75+S و R100+S که به آن‌هاپلیمر لاتکس افزوده شده است، نسبت به نمونه‌های بدون پلیمر لاتکس خود به ترتیب، ۱۴، ۱۹، ۱۰ و ۱۳ درصد بهبود MR مشاهده می‌شود که پلیمر لاتکس توانسته تا حدودی کاهش MR را جبران کند. این بهبود نشان‌دهنده آن است که پلیمر لاتکس می‌تواند به‌عنوان یک تقویت‌کننده مؤثر در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی عمل‌کرده و باعث بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی شود اما نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد تراشه تا حداکثر مقدار، تأثیرات آن بر مدول برجهندگی به حدی است که افزودن پلیمر لاتکس نیز نمی‌تواند به‌طور کامل این اثر منفی را خنثی کند. کاهش مدول بر جهندگی با افزایش RAP ناشی از کاهش پیوستگی و همبستگی مصالح به‌دلیل تفاوت بافت سطحی سنگدانه‌های قدیمی و جدید و نیز وجود قیر پیر شده با رفتار تردتر است. این شرایط سبب کاهش توانایی مخلوط در برگشت‌پذیری تغییرشکل‌ها شده و رفتار الاستیک مخلوط را تضعیف می‌کند.

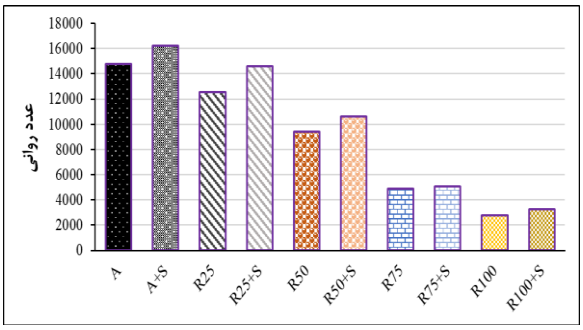


شکل ٦. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نتایج آزمایش خزش دینامیکی

شکل ۷ نتایج آزمایش خزش را نشان می‌دهد. نمونه A+S عدد روانی ۱۶۲۲۳ سیکل را نشان می‌دهد که حدود ۱۰ درصد از نمونه شاهد A با مقدار ۱۴۷۵۳ سیکل بیشتر بوده و دارای بالاترین مقدار FN است. با افزایش درصد تراشه آسفالتی، به ویژه در

سطوح بالاتر مانند ۷۵ و ۱۰۰ درصد، مقدار FN به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. مقاومت خزشی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر درصد تراشه آسفالت است. این امر نشان‌دهنده آن است که استفاده از تراشه آسفالت در مقادیر بالا ممکن است منجر به کاهش نسبتاً زیاد مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی شود. این کاهش می‌تواند به‌دلیل قیر پیر شده‌ای باشد که تمایل به شکنندگی بیشتر و انعطاف‌پذیری کمتر دارد که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت مخلوط در برابر خزش شود. همچنین قیر پیر شده دارای چسبندگی کمتری نسبت به قیر تازه است که می‌تواند پیوند بین سنگدانه‌ها و مصالح دیگر را تضعیف‌کرده و مقاومت مخلوط در برابر خزش را کاهش دهد. از منظر رئولوژیکی، قیر پیرشده به‌دلیل اکسیداسیون، خاصیت بازگشت‌پذیری ضعیفی دارد. در بارهای مکرر، این ویژگی باعث می‌شود کرنش‌های پلاستیک کوچک در هر سیکل انباشته شوند و به‌دلیل کاهش قفل‌وبست مؤثر بین سنگدانه‌ها، توانایی مخلوط را در تحمل کرنش‌های تجمعی کاهش‌داده و تمایل به شیارشدگی و تغییرشکل دائمی را افزایش می‌دهد. نمونه‌های حاوی تراشه آسفالتی با درصدهای بالا مانند R75 و R100 به‌ترتیب کاهش ۶۷ و ۸۱ درصدی مقاومت خزشی نسبت به نمونه شاهد را نشان دادند. افزودن پلیمر لاتکس باعث بهبود شاخص FN برای آسفالت سرد بازیافتی شده است اما در درصدهای بالای تراشه آسفالت، استفاده از پلیمر لاتکس نیز، باعث جبران قابل‌توجه در کاهش مقاومت و پایداری در برابر مقاومت خزشی نشده است. درنتیجه نمونه‌های R75 و R100 و حتی R75+S و R100+S از مقاومت خزشی به‌مراتب کمتری از نمونه‌ی شاهد برخورد هستند.



شکل ۷. نتایج آزمایش خزش دینامیکی

تحلیل آماری

نتایج به‌دست‌آمده از ویژگی‌های عملکردی آسفالت با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) با سطح اطمینان ۹۵ درصد، مطابق جدول ۵ مورد بررسی آماری قرار گرفت. سطح معناداری پارامترهای مستقل با مقادیر p نشان داده می‌شود و تأثیر پارامترهای مستقل بر پارامترهای وابسته را تعیین می‌کند. بر این اساس، همانطور که در معادله (۴) دیده می‌شود، فرضیه H_0 به معنای عدم تأثیر قابل‌توجه پارامتر مستقل بر پارامتر هدف است و درصورتی‌که H_0 رد شود، فرضیه H_1 نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه پارامتر مستقل بر پارامتر هدف است. ضریب معناداری α در این مطالعه ۰/۰۵ است. اگر مقدار p زیر یک آستانه مشخص باشد، فرضیه صفر H_0 رد می‌شود که نشان‌دهنده همبستگی قابل‌توجه بین متغیرهای وابسته و مستقل است. همچنین، مجذور اتا (η^2) محاسبه شد تا مشخص شود کدام پارامترهای مستقل تأثیر برجسته‌ای بر مقدار پارامتر وابسته دارند.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = ... = \mu_k$$
$$H_1 : \exists i, j \; s.t \; u_i \neq u_j \; (i, j = 1, 2, ...)$$ (رابطه ۴)

در جدول ۵، از ANOVA برای بررسی تأثیرات اصلاح کننده پلیمر لاتکس (در دو سطح ۰ و ۳ درصد) و نوع مخلوط (در ۵ سطح ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) بر مقدار ویژگی‌های عملکردی آسفالت استفاده شده است. در این جدول، هریک از پارامترهای مستقل شامل تأثیرات اصلاح کننده پلیمر لاتکس و نوع ترکیب به‌ترتیب با حروف BT و MT نشان داده شده‌اند. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که در مقاومت مارشال، نوع مخلوط (MT) با ضریب اتای ۰/۹۷۶ و مقدار p کمتر از ۰/۰۰۱ تأثیر معناداری داشته است. اصلاح‌کننده پلیمری (BT) نیز با ضریب اتای ۰/۳۶۶ و p-value برابر ۰/۰۰۳ تأثیر معنادار اما کمتری نشان داده است. اثر متقابل این دو پارامتر (MT×BT) با p-value برابر ۰/۱۳۲ معنادار نبوده است. درخصوص حساسیت رطوبتی، نوع مخلوط با ضریب اتای ۰/۷۷۱ و p-value کمتر از ۰/۰۰۱ تأثیر قابل‌توجهی داشته، درحالی‌که اصلاح‌کننده پلیمری با ضریب اتای ۰/۱۳۱ و p-value برابر ۰/۰۹۸ تأثیر معناداری نداشته است. اثر متقابل این پارامترها نیز با p-value برابر ۰/۷۷۵ معنادار نبوده است. در مورد خزش دینامیکی، هر دو پارامتر نوع مخلوط و اصلاح‌کننده پلیمری تأثیر بسیار قوی و معناداری داشته‌اند. نوع مخلوط با ضریب اتای ۰/۹۹۹ و اصلاح‌کننده پلیمری با ضریب اتای ۰/۹۰۴ (هر دو با p-value کمتر از ۰/۰۰۱) تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین اثر متقابل این

پارامترها نیز با ضریب اتای ۰/۸۰۱ و p-value کمتر از ۰/۰۰۱ معنادار بوده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت نوع مخلوط (MT) تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد آسفالت دارد و اصلاح‌کننده پلیمری (BT) نیز در اکثر خصوصیات مؤثر است. برجسته‌ترین اثرات متقابل در خزش دینامیکی مشاهده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب نوع مخلوط و استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری نقش کلیدی در تعیین خصوصیات عملکردی آسفالت دارد.

جدول ۵. نتایج تحلیل آماری ANOVA مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی

متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معناداری P	اندازه اثر η^2
(الف) مقاوت مارشال						
مدل تصحیح‌شده	۲۸/۰۰۸ [a]	۹	۳/۱۱۲	۹۳/۳۶۰	p < ۰/۰۰۱	۰/۹۷۷
عرض از مبدأ	۲۳۵۱/۴۴۵	۱	۲۳۵۱/۴۴۵	۷۰۵۴۳/۳۶۰	p < ۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
متغیرهای اصلی						
MT	۲۷/۳۵۵	۴	۶/۸۳۹	۲۰۵/۱۶۰	p < ۰/۰۰۱	۰/۹۷۶
BT	۰/۳۸۵	۱	۰/۳۸۵	۱۱/۵۶۰	۰/۰۰۳	۰/۳۶۶
تعامل دو طرفه						
MT × BT	۰/۲۶۸	۴	۰/۰۶۷	۲/۰۱۰	۰/۱۳۲	۰/۲۸۷
خطا	۰/۶۶۷	۲۰	۰/۰۳۳			
کل	۲۳۸۰/۱۲۰	۳۰				
تصحیح شده کل	۲۸/۶۷۵	۲۹				
a. R^2=۰/۹۷۷						
(ب) حساسیت رطوبتی						
مدل تصحیح‌شده	۳۰۸/۶۰۰ [a]	۹	۳۴/۲۸۹	۸/۰۰۰	p < ۰/۰۰۱	۰/۷۸۳
عرض از مبدأ	۲۰۱۱۷۹/۱۶۳	۱	۲۰۱۱۷۹/۱۶۳	۴۶۹۳۵/۰۲۵	p < ۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
متغیرهای اصلی						
MT	۲۸۸/۰۳۵	۴	۷۲/۰۰۹	۱۶/۸۰۰	p < ۰/۰۰۱	۰/۷۷۱
BT	۱۲/۹۳۶	۱	۱۲/۹۳۶	۳/۰۱۸	۰/۰۹۸	۰/۱۳۱
تعامل دو طرفه						
MT × BT	۷/۶۲۹	۴	۱/۹۰۷	۰/۴۴۵	۰/۷۷۵	۰/۰۸۲
خطا	۸۵/۷۲۷	۲۰	۴/۲۸۶			
کل	۲۰۱۵۷۳/۴۹۰	۳۰				
تصحیح شده کل	۳۹۴/۳۲۷	۲۹				
a. R^2=۰/۷۸۳						

(ج) خزش دینامیکی					
مدل تصحیح‌شده	۷۰۴۶۴۲۲۲۷/۳۵۵[a]	۹	۷۸۲۹۳۵۸۰/۸۱۵	۱۷۴۶/۰۵۲	p < ۰/۰۰۱	۰/۹۹۹
عرض از مبدأ	۲۶۵۷۸۰۹۵۰۷/۶۹۲	۱	۲۶۵۷۸۰۹۵۰۷/۶۹۲	۵۹۲۷۲/۷۰۸	p < ۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
متغیرهای اصلی						
MT	۶۹۲۵۶۲۵۳۷/۳۲۱	۴	۱۷۳۱۴۰۶۳۴/۳۳۰	۳۸۶۱/۲۶۸	p < ۰/۰۰۱	۰/۹۹۹
BT	۸۴۶۲۲۲۸/۷۴۱	۱	۸۴۶۲۲۲۸/۷۴۱	۱۸۸/۱۷۹	p < ۰/۰۰۱	۰/۹۰۴
تعامل دو طرفه						
MT × BT	۳۶۱۷۴۶۱/۲۷۲	۴	۹۰۴۳۶۵/۳۱۸	۲۰/۱۶۹	p < ۰/۰۰۱	۰/۸۰۱
خطا	۸۹۶۸۰۷/۱۷۳	۲۰	۴۴۸۴۰/۳۵۹			
کل	۳۳۶۳۳۴۸۵۴۲/۲۰۰	۳۰				
تصحیح شده کل	۷۰۵۵۳۹۰۳۴/۵۰۸	۲۹				

a. R^2=۰/۹۷۶

نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش، تأثیر استفاده از درصدهای متفاوت تراشه آسفالت شامل ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و همچنین اصلاح قیر امولسیون با پلیمر لاتکس بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی مورد مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد این مخلوط‌ها، آزمایش‌هایی شامل مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیکی در کنار تحلیل آماری به منظور بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته و شناسایی پارامترهای کلیدی صورت گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در ادامه ارائه شده است:

افزودن تراشه آسفالت به مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی از یک‌سو باعث کاهش مقاومت مارشال می‌شود اما از سوی دیگر مقاومت کششی غیرمستقیم و شاخص حساسیت رطوبتی را افزایش می‌دهد. استفاده از پلیمر لاتکس به‌عنوان یک افزودنی، راه‌حلی برای بهبود عملکرد کلی این مخلوط‌ها می‌باشد. لاتکس با بهبود چسبندگی قیر، هم افت مقاومت مارشال ناشی از تراشه را جبران می‌کند و هم مقاومت کششی را بیش از پیش تقویت می‌نماید. درنتیجه، ترکیبی که حاوی بیشترین درصد تراشه آسفالت و پلیمر لاتکس است، توانست به بالاترین مقاومت کششی دست یابد.

افزودن تراشه آسفالتی به مخلوط‌های آسفالتی سرد موجب کاهش قابل‌توجه مقاومت خزشی و مدول برجهندگی می‌شود، به‌ویژه در درصدهای بالای تراشه (۷۵ و ۱۰۰ درصد) که ناشی از خواص قیر پیر شده و کاهش چسبندگی و انعطاف‌پذیری است. استفاده از پلیمر لاتکس تا حدی توانسته این افت مقاومت را جبران کند و بهبود نسبی در خواص مکانیکی مخلوط‌های بازیافتی ایجاد نماید، اما در درصدهای بالای تراشه آسفالتی، تأثیر آن محدود بوده و قادر به خنثی‌سازی کامل کاهش مقاومت نیست.

مطالعات ANOVA نشان داد که نوع مخلوط تأثیر معناداری بر ویژگی‌های عملکردی آسفالت (مقاومت مارشال، نسبت مقاومت کششی و عدد جریان) دارد. اصلاح‌کننده پلیمر لاتکس نیز به جز در حساسیت رطوبتی، در سایر ویژگی‌ها مانند مقاومت مارشال و خزش دینامیکی تأثیر معناداری داشته است. برجسته‌ترین اثرات متقابل این دو پارامتر در خزش دینامیکی مشاهده شد. این نتایج تأکید می‌کند که نوع مخلوط و استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نقش اساسی دارند.

این پژوهش نشان داد که پلیمر لاتکس راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی است و می‌تواند افت‌های عملکردی را تا حد قابل‌توجهی جبران‌کرده و خواص مکانیکی مخلوط‌ها را بهبود بخشد.

References

[1] Sapkota K, Yaghoubi E, Wasantha P, Van Staden R, Fragomeni S. Mechanical characteristics and durability of HMA made of recycled aggregates. Sustainability. 2023;15(6):5594. https://doi.org/10.3390/su15065594

[2] Pattanaik ML, Choudhary R, Kumar B, Kumar A. Mechanical properties of open graded friction course mixtures with different contents of electric arc furnace steel slag as an alternative aggregate from steel industries. Road Mater Pavement Des. 2021;22(2):268-292. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1620120

[3] Zhu J, Birgisson B, Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. Eur Polym J. 2014;54:18-38. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005

[4] Dughaishi HA, Lawati JA, Bilema M, Babalghaith AM, Mashaan NS, Yusoff NIM, Milad A. Encouraging sustainable use of RAP materials for pavement construction in Oman: A review. Recycling. 2022;7(3):35. https://doi.org/10.3390/recycling7030035

[5] Wang D, Yang L, Zhang Q, Zheng Y, Hu L, Cheng K, Wei J. Comprehensive evaluation of energy consumption and carbon emissions of asphalt pavement recycling technology. Case Stud Constr Mater. 2024;20:e02987. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02987

[6] Mavridou S, Kaisidou E. Examination of bituminous mixtures made of conventional aggregates and recycled materials. In: 4th International Conference on Sustainable Solid Waste Management; 2016 Jun 23-25; Limassol, Cyprus.

[7] Xiao F, Amirkhanian S, Juang CH. Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures. J Mater Civ Eng. 2007;19(6):475-483. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(475)

[8] Yildirim Y. Polymer modified asphalt binders. Constr Build Mater. 2007;21(1):66-72. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007

[9] Jin D, Yin L, Malburg L, You Z. Laboratory evaluation and field demonstration of cold in-place recycling asphalt mixture in Michigan low-volume road. Case Stud Constr Mater. 2024;20:e02923. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02923

[10] Flores G, Gallego J, Miranda L, Marcobal JR. Design methodology for in situ cold recycled mixtures with emulsion and 100% RAP. Constr Build Mater. 2019;216:496-505. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.026

[11] Jiang J, Ni F, Zheng J, Han Y, Zhao X. Improving the high-temperature performance of cold recycled mixtures by polymer-modified asphalt emulsion. Int J Pavement Eng. 2020;21(1):41-48. https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435882

[12] Raschia S, Graziani A, Carter A, Perraton D. Laboratory mechanical characterisation of cold recycled mixtures produced with different RAP sources. Road Mater Pavement Des. 2019;20(sup1):S233-S246. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1588777

[13] Ameri M, Behnood A. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. Constr Build Mater. 2012;26(1):475-480. (in Persian). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.047

[14] Modarres A, Ayar P. Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement. Int J Pavement Eng. 2016;17(3):211-224. (in Persian). https://doi.org/10.1080/10298436.2014.979821

[15] Ogundipe OM. Marshall stability and flow of lime-modified asphalt concrete. Transp Res Procedia. 2016;14:685-693. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.333

[16] ASTM International. ASTM D6931-12: Standard test method for indirect tensile (IDT) strength of bituminous mixtures. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2012. https://doi.org/10.1520/D6931-12.2

[17] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 283: Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Washington (DC): AASHTO; 2007.

[18] Van Thanh D, Feng CP. Study on Marshall and rutting test of SMA at abnormally high temperature. Constr Build Mater. 2013;47:1337-1341. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.035

[19] ASTM International. ASTM D4123-82(1995): Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures (Withdrawn 2003). West Conshohocken (PA): ASTM International; 1995.

[20] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO TP 79: Standard method of test for determining the dynamic modulus and flow number for asphalt mixtures using the asphalt mixture performance tester (AMPT). Washington (DC): AASHTO; 2015.

[21] Zargar M. Development and application of a new multistage confined dynamic creep test for asphalt [Doctoral dissertation]. University of Southern Queensland; 2018.

[22] Irfan M, Ali Y, Iqbal S, Ahmed S, Hafeez I. Rutting evaluation of asphalt mixtures using static, dynamic, and repeated creep load tests. Arab J Sci Eng. 2018;43(10):5143-5155. https://doi.org/10.1007/s13369-018-3129-2

Applied Research in Infrastructure Engineering Open Access

Spring & Summer (2026) 13-24

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of the Performance Properties of Recycled Cold Asphalt Mixtures Modified with Polymer Latex

Mohammad Ali Ziari[1], Mohammad Zia Alavi[2], Massoud Palassi[3*], Mahdi Zalnezhad[4]

1. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Assistant Prof, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Prof, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
4. PhD, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Correspondence:
Massoud Palassi
Email: mpalas@ut.ac.ir

Received: 25 Nov 2024
Accepted: 28 Dec 2025

How to cite:
Ziari, M.A., Alavi, M.Z., Palassi, M. & Zalnezhad, M. (2026). Evaluation of the Performance Properties of Recycled Cold Asphalt Mixtures Modified with Polymer Latex. *Applied Research in Infrastructure Engineering*, 1(1), 13-24.
(DOI:)

ABSTRACT

Recycled cold asphalt mixtures have gained significant prominence in road construction projects due to energy cost reduction, effective waste management, and positive environmental impacts. However, the incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) can adversely affect the mechanical properties of the mixture. This study investigates the effects of various RAP percentages (0, 25, 50, 75, and 100%) and the modification of bitumen emulsion with SBR latex polymer on the performance of cold asphalt mixtures. Specimens were fabricated using the modified Marshall method, targeting an optimum air void range of 9–14% and a bitumen emulsion content of 3.5–5.5%. Subsequently, laboratory tests including Marshall stability, Indirect Tensile Strength (ITS), Resilient Modulus (MR), moisture sensitivity, and dynamic creep were conducted. Furthermore, Analysis of Variance (ANOVA) was employed to evaluate the effects of independent variables and their interactions. The results indicated that increasing RAP content led to a reduction in Marshall stability (up to 24%), resilient modulus (up to 76%), and creep resistance (up to 81%), whereas moisture sensitivity and indirect tensile strength improved by 13% and 15%, respectively. The incorporation of polymer latex partially compensated for the performance loss caused by RAP and enhanced mechanical properties, such as Marshall stability. However, at higher RAP percentages, this effect was limited and could not fully offset the performance decline. The findings suggest that combining RAP with polymer latex, through the optimization of RAP content and modifier dosage, can serve as an effective strategy for enhancing the performance of recycled cold asphalt mixtures in road infrastructure projects.

KEYWORDS

Recycled Cold Asphalt, Polymer Latex, Moisture Susceptibility, Performance Properties.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Payame Noor University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.