

ارزیابی عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف مصالح خرده آسفالتی

اصلاح شده با پلیمر پسماند پولی بوتادین رابر

داریوش دریایی^{۱*}، مصطفی وامق^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

*نویسنده مسئول: D.Daryae@malayeru.ac.ir

چکیده

در این تحقیق اثر پلیمر پسماند پولی بوتادین رابر (PBR)، در ارزیابی عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالتی (RAP) بررسی شده است. درصد‌های مختلف RAP شامل ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد برای تهیه مخلوط آسفالتی انتخاب شدند. برای تهیه قیر پلیمری، قیر ۶۰/۷۰ با ۵ درصد وزنی از پلیمر پسماند PBR مخلوط شده و به‌عنوان قیر تازه در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP اضافه شد. در این مطالعه آزمایش‌های تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌ها، آزمایش لاتمن اصلاح شده برای ارزیابی حساسیت رطوبتی و آزمایش ویل تراک هامبورگ برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP استفاده شد. نتایج نشان داد که وجود پلیمر ضایعاتی مورد استفاده باعث شده که مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد RAP نسبت به مخلوط کنترل افزایش قابل توجهی داشته باشد. همچنین استفاده از این پلیمر می‌تواند در مخلوط‌های آسفالتی با درصد RAP کمتر از ۵۰ درصد (حدوداً ۴۰ درصد) بدون هیچ‌گونه نگرانی از کاهش مقاومت خستگی آسفالت استفاده کرد. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از قیر پلیمری در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP، مقاومت مخلوط‌ها در برابر حساسیت رطوبتی افزایش قابل توجهی نسبت به مخلوط کنترل داشته است. نتایج آزمایش ویل تراک هامبورگ هم نشان داد که ترکیب مصالح RAP و قیر پلیمری توانسته است، عمق شیار را تا ۷۰ درصد نسبت به مخلوط کنترل کاهش دهد.

کلمات کلیدی

پسماند پولی بوتادین رابر، مصالح RAP، خستگی، حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی.

مصالح خرده آسفالتی (RAP¹)، مصالحی هستند که از تراشیدن آسفالت روسازیهای مضمحل شده توسط دستگاههای آسیاب کننده تولید و در محلهایی دپو و جمع آوری می شوند [1]. این مصالح از قیر سالخورده و سنگدانه های قدیمی تشکیل می شوند. امروزه با هدف نگهداری از منابع تجدید ناپذیر در پروژه های بازافت سرد و گرم آسفالت از مصالح RAP استفاده می شود [2]. به دلیل اکسیداسیون و از بین رفتن مواد فرار قیر موجود در مصالح RAP، قیر سالخورده و پیر شده و بسیاری از پارامترهای آن مانند مدول برشی مختلط، زاویه فاز، درجه نفوذ، ویسکوزیته و ... دچار تغییر می شود [3]. محققین همیشه در استفاده از درصدهای مختلف RAP در تهیه مخلوط آسفالت داغ سعی داشتند تا بتوانند مخلوطی در حد مخلوط آسفالت داغ بدون مصالح RAP تولید کنند [3-5]. یکی از مشکلاتی که افزودن مصالح RAP به آسفالت داغ دارد، کاهش مقاومت آن در برابر پدیده خستگی است [6]. این امر بدین خاطر است که با افزودن مصالح RAP، مخلوط آسفالتی سخت تر شده و در دمای متوسط برابر بارهای وارده ناشی از پدیده خستگی شکننده تر می شود [7]. راهکارهای مختلفی برای افزایش مقاومت خستگی مخلوطهای آسفالتی حاوی RAP معرفی شده است مانند استفاده از جوانسازها، قیرهای با درجه نفوذ بالا، پلیمرها و [1-10, 8, 5, 1].

تحقیقات نشان داد که افزودن جوانسازها باعث احیا خصوصیات قیر سالخورده شده و می تواند مقاومت خستگی و دیگر پارامترهای عملکردی قیر و مخلوطهای آسفالتی حاوی RAP را نسبت به مخلوط کنترل (همان مخلوط آسفالتی داغ بدون مصالح RAP) بهبود ببخشد [7]. عامری و همکارانش نشان دادند که افزودن جوانساز های نفتی باعث بهبود مقاومت خستگی مخلوط های آسفالتی تا ۱۰۰ درصد RAP می شوند [11-12]. تحقیقات نشان داد که اثر ترکیبی پلیمر و جوانساز می تواند مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰ درصد RAP را به طور چشمگیری بالا ببرد [13]. از آنجاییکه مخلوطهای حاوی RAP دارای مقاومت شیارشدگی مناسبی هستند، محققین با استفاده از نتایج آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوطهای حاوی ۵۰ درصد RAP دریافتند که افزایش پلیمر پسماند PBR اثر منفی بر مقاومت شیار شدگی مخلوطهای حاوی RAP ندارد [13].

امروزه به دلیل مقدار زیاد پسماندهای پلیمر، استفاده از آنها در اصلاح قیرهای مورد استفاده در روسازی به عنوان یک وظیفه در بین محققین مطرح شده است [14]. لی و همکاران از استایرن-بوتادین-رابر (SBR²) به عنوان یک افزودنی جدید به مخلوط RAP استفاده کرد. آنها دریافتند که SBR توانایی افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای پایین و مقاومت شیارشدگی در دما بالا را داراست. همچنین حساسیت مخلوطها را نسبت به رطوبت کاهش می دهد [5]. کیم و همکاران دریافتند که با استفاده از آزمونهای کشش غیرمستقیم سوپر پیو پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS³) می تواند مقاومت خستگی و شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی حاوی ۳۵ درصد RAP را در مقایسه با مخلوطهای شاهد بدون RAP بهبود بخشند [15].

بر اساس تحقیقاتی که بر روی افزودن پلیمرهای ضایعاتی نظیر SBR بر روی مخلوطهای آسفالتی HMA شده است، نتایج نشان داده که استفاده از این افزودنیها نقش قابل توجهی در افزایش مقاومت ترک خوردگی و مقاومت خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی HMA داشته اند [16-17].

موگاور و همکاران دریافتند که ترکیبی از جوان کننده و قیر اصلاح شده پلیمری عملکرد مخلوط RAP بالا را در مقایسه با مخلوط معمولی بهبود می بخشد [1]. در سال ۲۰۲۱ محققین با انجام آزمایش های LAS⁴ و MSCR⁵ دریافتند که ترکیب پلیمر پسماند PBR⁶ و جوانساز می تواند مقاومت خستگی و مقاومت شیارشدگی قیرهای حاوی قیر بازافتی را بهبود بخشد [14]. منصورخاکی و همکارانش اثر پلیمر PBR را بر خصوصیات شیمیایی و رئولوژیکی قیرهای حاوی قیر بازافتی بررسی کردند و دریافتند که بین خصوصیات شیمیایی و رئولوژیکی این قیرها ارتباط آماری خوبی برقرار است [18].

¹ Reclaimed Asphalt Pavement

² Styrene-Butadiene-Rubber

³ Styrene-Butadiene-Styrene

⁴ Linear Amplitude Sweep

⁵ Multiple Stress Creep Recovery

⁶ Poly-Butadiene-Rubber

منصورخاکی و همکارش در سال ۲۰۲۰ با انجام آزمایش‌های DSR و MSCR در دمای بالا بر روی قیرهای بازیافتی که حاوی پلیمر پسماند PBR بودند، دریافته‌اند که افزودن پلیمر PBR باعث افزایش پارامتر R و کاهش Jnr می‌شود که این امر نشان‌دهنده افزایش مقاومت شیارشدگی این نوع قیرها بود [19].

عامری و همکارانش در سال ۲۰۱۹ اثرات پلیمر پسماند PBR را بر روی قیرهای بازیافتی بررسی کردند. آنها با انجام آزمایش جاروب زمان (time sweep) بر روی این قیرها متوجه شدند که قیرهای حاوی ۳۰ درصد قیر بازیافتی که با پلیمر پسماند اصلاح شده بودند، دارای مقاومت بسیار بالایی در برابر پدیده خستگی می‌باشند [12].

در سال ۲۰۲۲، با استفاده از آزمایش pull-off مقاومت چسبندگی نمونه‌های قیری حاوی درصد‌های مختلف قیر بازیافتی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد قیر بازیافتی به دلیل پیوستگی که از قبل بین مصالح سنگی و قیر سالخورده وجود داشته است، مقاومت چسبندگی نمونه‌های قیری نیز افزایش می‌یابد. همچنین رابطه آماری نسبتاً خوبی بین نتایج آزمایش pull-off و نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده برای این نوع قیرها معرفی گردید [20].

یکی از ویژگی‌های این تحقیق این است که پسماند پلیمر PBR می‌تواند به‌عنوان یک گزینه دوستدار محیط‌زیست در کنار استفاده از مصالح خرده آسفالتی که خود یک مصالح بازیافتی است، قرار گیرد.

باتوجه به تحقیقات قبل و مطالعات پیشین می‌توان به این نکته اشاره کرد که در این مطالعات بیشتر اثر ترکیبی جوان‌ساز و پلیمر پسماند PBR بر روی قیرهای حاوی قیر بازیافتی و مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP بررسی شده بود. همچنین بسیاری از تحقیقات اثر پلیمرهای پسماند را فقط بر روی مخلوط آسفالتی HMA بر سی کرده بودند؛ بنابراین در این تحقیق سعی شد فقط اثر پلیمر پسماند PBR به‌تنهایی بر مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP بررسی شود. هدف از این تحقیق این بود که آیا این پلیمر ضایعاتی می‌تواند تاثیر مثبتی بر رفتار دمای میانی یا همان عمر خستگی داشته باشد بدون اینکه اثر منفی بر دیگر پارامترهای عملکردی نظیر حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی داشته باشد.

باتوجه به اینکه تاکنون تحقیقات کمی در زمینه اثر پسماند PBR به‌تنهایی بر روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف RAP انجام شده است، در این تحقیق تأثیر این پسماند بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف RAP (۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) صورت می‌گیرد. در این تحقیق از آزمایش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای برای ارزیابی مقاومت خستگی مخلوط‌ها، از آزمایش کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها و از آزمایش ویلتراک هامبورگ^۱ برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است.

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱- مصالح سنگی و RAP

مصالح سنگی تازه مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی در این تحقیق بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران (نشریه ۲۳۴) دانه‌بندی شده و در شکل (۱) نشان داده شده است [21]. نوع سنگدانه‌های انتخابی در این تحقیق، سنگدانه‌های آهکی بود که از معدن اسب چران واقع در شهرستان رودهن تهیه گردید. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شد.

جدول ۱ - خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

Table 1- Characteristics of used aggregate

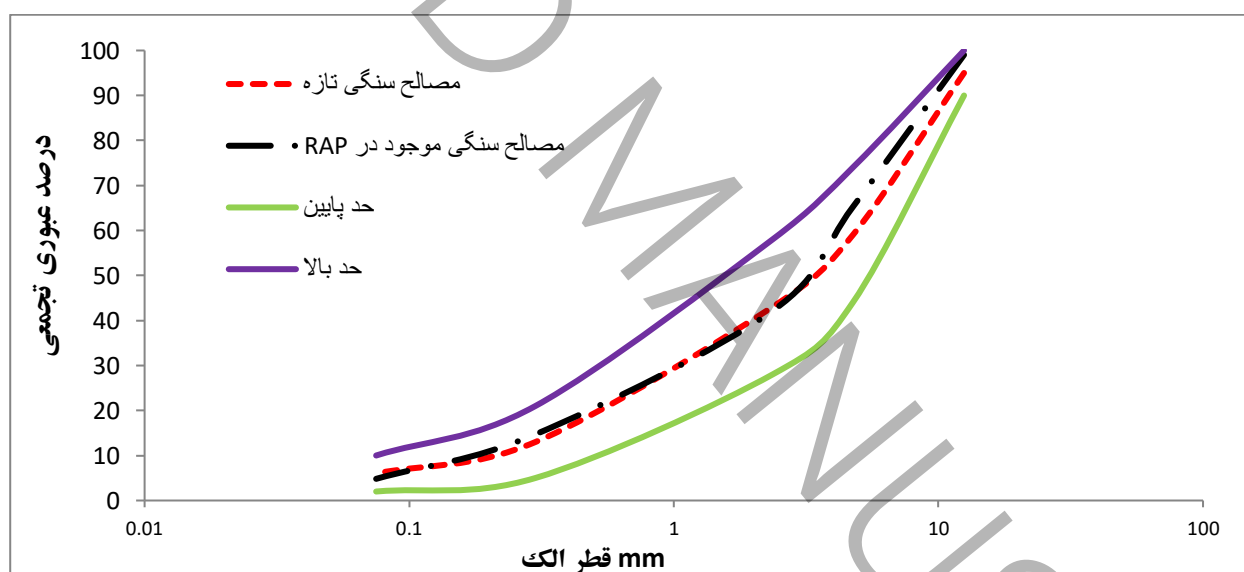
استاندارد آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
	رویه	آستر		
AASHTO T96	۳۰	۴۰	۲۲/۳	حداکثر سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)
BS 812	۲۵	۳۰	۱۶	حداکثر ضریب تورق (درصد)

¹ Hamburg Wheel-Track

ASTM D5821	۹۰	۸۰	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (درصد)
AASHTO T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
AASHTO T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
ASTM C127	-	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی (gt/cm ³) مصالح سنگی درشت‌دانه
ASTM C128	-	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی (gt/cm ³) مصالح سنگی ریزدانه

مصالح RAP نیز از دپوی شهرداری تهران مربوط به یکی از بزرگراه‌های تهران تهیه شد. قیر موجود در مصالح RAP با استفاده از روش ASTM D2172 مستخرج شده و سپس بر اساس استاندارد ASTM D5404 بازیابی گردید. آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی بر روی قیر بازیابی شده (قیر سالخورده) صورت گرفت و نتایج نشان داد که قیر سالخورده موجود در مصالح RAP دارای درجه نفوذ ۳۰ دهم میلیمتر و نقطه نرمی ۵۷ درجه سانتیگراد بوده است.

با انجام آزمایش تعیین درصد قیر موجود در مصالح RAP با استفاده از روش سوزاندن مطابق استاندارد ASTM D6307-19، درصد قیر موجود در مصالح RAP در حدود ۵/۵ درصد وزنی مخلوط بدست آمد. سپس برای ساخت نمونه‌های مخلوط بتن آسفالتی با ترکیب‌های مختلف RAP بایستی دانه بندی واقعی مصالح سنگی مصالح تراشه که همان دانه بندی بعد از استخراج قیر است، در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه دانه بندی مصالح RAP در محدوده دانه بندی شماره ۴ آیین نامه قرار نداشت، با افزودن ۴ درصد فیلر دانه بندی مصالح RAP اصلاح شد. در شکل ۱، دانه بندی مصالح RAP نیز نشان داده شده است.



شکل ۱: دانه بندی مصالح سنگی تازه و RAP

Figure 1- Gradation of virgin aggregate and RAP

۲-۲- قیر

در این تحقیق قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ به عنوان قیر کنترلی انتخاب شد. قیر مورد استفاده از پالایشگاه تهران تهیه شد. خصوصیات قیر مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات قیر مورد استفاده ۶۰/۷۰

Table 2- Characteristics of used 60/70 bitumen

مقدار	استاندارد (ASTM)	ویژگی
۲۹۸	D99	نقطه اشتعال (درجه سانتیگراد)
بیشتر از ۱۰۰	D113	شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه (سانتیمتر)
۴۹	D36	نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)
۶۵	D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه (دهم میلیمتر)
۱/۰۱۶	D70	چگالی ویژه در دمای ۲۵ درجه
۳۶۵	D4402	ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۳۵ درجه (میلی پاسکال ثانیه)

۲-۳- پلیمر ضایعاتی PBR (پسماند)

در این تحقیق، پسماند پولی بوتادین رابر^۱ (WPBR) برای تهیه قیر پلیمری اصلاح شده جهت افزودن به مصالح RAP استفاده شد. پسماند PBR از دورریزهای پولی بوتادین رابر (PBR1220) تهیه شده از کارخانه پتروشیمی اراک تهیه شد (شکل ۲). مشخصات PBR1220 در جدول ۳ آورده شده است. پسماند پلیمر PBR به دلیل هزینه کم، دردسترس بودن و خاصیت دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) پایین در این تحقیق استفاده شده است.

جدول ۳: مشخصات پلیمر PBR1220

Table 3- Characteristics of PBR 1220

مقدار	استاندارد (ASTM)	ویژگی
۴۵±۵	D1664	ویسکوزیته مولکولی (ML 1+4 @ 100°C) (MU)
حداکثر ۰/۷۵	D1416	مواد فرار (درصد وزنی)
حداکثر ۰/۵	D1416	درصد خاکستر (درصد وزنی)
حداقل ۹۶	-	درصد Cis
۱۴۰	-	نقطه ذوب (درجه سانتیگراد)
<-90	-	دمای شیشه‌ای (درجه سانتیگراد)



¹ Waste poly butadiene Rubber

شکل ۲: PBR ضایعاتی

Figure 2- Waste PBR

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه قیر اصلاح شده پلیمری (WPMB) که قرار است به‌عنوان قیر تازه در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد افزوده شود، قیر کنترلی (قیر ۶۰/۷۰) با ۵ درصد وزنی پسماند PBR در یک همزن با سرعت برشی بالا (۶۰۰۰ دور در دقیقه) به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد مخلوط شد.

باتوجه به تحقیقی که در سال ۲۰۱۹ بر روی قیرهای بازیافتی حاوی پلیمر پسماند PBR صورت گرفته است، تصویر نمونه قیر با استفاده از آزمایش AFM نشان می‌دهد که پدیده فلوکوله شدن در قیر بازیافتی حاوی پلیمر PBR رخ نمی‌دهد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در این نمونه قیر فقط ذرات با ساختار زنبوری شکل (bee structure) آن هم به دلیل وجود قیر بازیافتی (قیر سالخورده) و ذرات بسیار ریز پوسته پوسته شکل به دلیل وجود پلیمر پسماند دیده می‌شود [16].



شکل ۳: عکس توپوگرافی AFM (۴۰*۴۰ میکرومتر مربع) قیر بازیافتی حاوی پسماند [16]

Figure 3- AFM topography photo (40 x 40 square micrometers) of recycled bitumen containing waste PBR [16]

آزمایش پایداری ذخیره‌سازی بر روی نمونه‌های قیر حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد قیر بازیافتی که با پلیمر پسماند PBR ترکیب شده بودند، طبق استاندارد آشتو شماره PP5 صورت گرفت. نقطه نرمی در قسمت بالا و پایین نمونه‌های قیری انجام شد. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، چون تفاوت نقطه نرمی بین قسمت بالا و پایین نمونه‌های قیری کمتر از ۲/۵ درجه سانتیگراد است، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های قیری حاوی پلیمر پسماند PBR دارای پایداری ذخیره‌سازی می‌باشند.

جدول ۴: نتایج آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

Table 4- Storage stability test results

نمونه‌ها	تفاوت بین نقطه نرمی در بالا و پایین نمونه قیر (درجه)
قیر حاوی ۵۰ درصد قیر بازیافتی اصلاح شده با پلیمر PBR	۱/۹

در این تحقیق چهار نوع طرح مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت: مخلوط اول: مخلوط آسفالتی کنترلی که بدون RAP قیر خالص ۶۰/۷۰ (اصلاح نشده)، مخلوط دوم: مخلوط آسفالتی با ۲۰ درصد RAP و ۸۰ درصد مصالح سنگی جدید و قیر اصلاح شده، مخلوط سوم: مخلوط آسفالتی که حاوی ۳۰ درصد RAP و ۷۰ درصد مصالح سنگی جدید و قیر اصلاح شده و مخلوط چهارم: مخلوط آسفالتی که حاوی ۵۰ درصد RAP و ۵۰ درصد مصالح سنگی جدید و قیر اصلاح شده.

برای تعیین درصد قیر بهینه در هر مخلوط آسفالتی از روش طرح اختلاط مارشال مطابق استاندارد ASTM D-1559 استفاده شد [22]. جدول ۵ نتایج طرح اختلاط را برای هر مخلوط نشان می دهد.

جدول ۵: نتایج آزمایش مارشال برای مخلوط‌های مختلف

Table 5- Results of Marshall test for different mixtures

نوع مخلوط	درصد قیر بهینه	VMA (%)	Air Voids (%)	Gmb	Gmm	درصد قیر مورد نیاز
Control(0%RAP)	۴/۸	۱۴/۵	۴	۲/۳۸	۲/۴۷۸	۴/۸ (60/70)
20%RAP+WPBR	۵/۳۵	۱۵/۴	۴	۲/۳۸۲	۲/۴۸۱	۴/۲۸ (WPMB)
30%RAP+WPBR	۵/۳۵	۱۴/۹	۴/۱	۲/۳۸	۲/۴۸	۳/۷۴(WPMB)
50%RAP+WPMB	۵/۵	۱۵/۲	۴/۲	۲/۳۷۲	۲/۴۷۶	۲/۷۵ (WPMB)

برای آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی، مصالح سنگی تازه و قیر ۶۰/۷۰ و قیر اصلاح شده پلیمری در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به ترتیب به مدت ۴ ساعت و ۲ ساعت قبل از شروع مرحله مخلوط کردن حرارت داده شدند. برای بهتر مخلوط شدن مصالح RAP و مصالح تازه، ۲ ساعت قبل از شروع عملیات مخلوط کردن، مصالح RAP به مصالح سنگی تازه داغ شده (در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد) اضافه شد.

در این تحقیق از هر طرح اختلاط، سه نمونه استوانه‌ای شکل برای آزمایش ویل تراک هامبورگ و شش نمونه برای آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی سوپرپیو (Superpave Gyratory Compactor) با سطح تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال، سرعت چرخش ۳۰ دور در دقیقه و زاویه چرخش ۱/۲۵ درجه با در صد فضای خالی ۴ در صد برای آزمایش ویل تراک هامبورگ و با در صد فضای خالی ۷ درصد برای آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) تهیه شدند.

برای نمونه‌های نهایی که با دستگاه متراکم‌کننده چرخشی سوپرپیو ساخته شده است با ثبت مقدار Gmm نمونه‌ها در دستگاه، با اندازه‌گیری لحظه‌ای خصوصیات حجمی مخلوط آسفالت و رسیدن دستگاه به مقدار در صد فضای خالی مورد نظر تراکم متوقف خواهد شد که برای تست ویل تراک ۴ درصد و برای تست مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) ۷ درصد در نظر گرفته شده است.

برای انجام آزمایش خستگی تیر چهار نقطه‌ای با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده برشی (Prism Shear Box Compactor) نمونه‌های دالی شکل به ابعاد ۱۵۰*۱۶۰*۴۵۰ میلی‌متر با در صد فضای خالی ۴ درصد تهیه شد. برای نمونه‌های نهایی دالی شکل که با Prism Shear Box Compactor ساخته شده است با ثبت خصوصیات مخلوط آسفالتی در متراکم‌کننده دال، دستگاه با رسیدن به در صد فضای خالی ۴ درصد عمل تراکم متوقف خواهد شد. شکل ۴ دستگاه متراکم‌کننده برشی را نشان می دهد.



شکل ۴: تصویر دستگاه متراکم کننده برشی Prism Shear Box Compactor

Figure 4- Image of the Prism Shear Box Compactor

بعد از تهیه دال متراکم شده به ابعاد $150 * 160 * 450$ میلیمتر که از دستگاه متراکم کننده برشی بدست آمده بود، با استفاده از تیغه دوار دالها به ۶ تیرچه به ابعاد $50 * 63 * 380$ برش داده می شوند. شکل ۵، تعدادی از تیرچه های برش خورده را نشان می دهد.



شکل ۵: تیرچه های برش خورده برای آزمایش خستگی

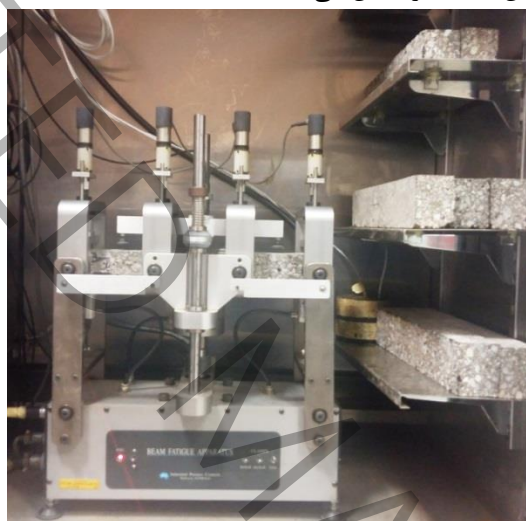
Figure 5- used beams for fatigue testing

درصد فضای خالی بتن آسفالتی برای هر تیرچه 4 ± 0.2 درصد بود. برای هر سطح کرنش سه نمونه تیرچه مورد ارزیابی با آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی قرار گرفت و میانگین آن‌ها به عنوان عمر خستگی در سطح کرنش مورد نظر معرفی شد.

۴- برنامه آزمایش‌ها

۴-۱- آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای برای ارزیابی رفتار خستگی

یکی از قابل اطمینان‌ترین آزمایش‌ها برای ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای است. آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی بر اساس استاندارد AASHTO T321 انجام می‌شود [23-24]. قبل از هر آزمایش، نمونه‌های تیرچه در دمای 20 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت در محفظه آزمایش قرار داده شدند. شکل ۶، نمونه‌های تیرچه و دستگاه آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۶: شکل دستگاه آزمایش تیر چند نقطه‌ای خمشی خستگی

Figure 6- The image of four-point bending beam fatigue testing device

در این تحقیق، تیرچه‌های خستگی در معرض بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس 10 هرتز در دمای 20 درجه سانتیگراد قرار گرفتند. آزمایش خستگی با استفاده از روش کنترل کرنش در سه سطح کرنش 500 ، 700 و 800 میکرواسترین صورت گرفت.

در این تحقیق به منظور مقایسه نتایج عمر خستگی با تحقیقات قبلی از روش کنترل کرنش استفاده شده است. مقدار عمر خستگی در سه سطح کرنش 500 ، 700 و 800 میکرواسترین تعیین شده است. دلیل انتخاب این سطوح کرنش، قرار گرفتن عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در محدوده 10000 تا 1000000 سیکل است که توصیه اکثر استانداردها است.

عمر خستگی در هر نمونه بر اساس تعداد سیکل‌هایی که باعث کاهش 50 درصدی در سختی اولیه نمونه شود محاسبه شده است. سختی اولیه هر نمونه مقدار سختی آن در سیکل پنجاهم آزمایش بوده است.

۴-۲- آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS) لاتمن اصلاح شده برای ارزیابی حساسیت رطوبتی

آزمایش کشش غیرمستقیم برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت مطابق استاندارد AASHTO T283 به کار گرفته می‌شود [25-27]. برای انجام این آزمایش برای هر طرح اختلاط شش نمونه استوانه‌ای شکل تهیه می‌شود. سه تا از نمونه‌ها در شرایط سیکلهای ذوب و یخبندان قرار گرفته و سه تای دیگر بدون قرار گرفتن در شرایط خاصی در دمای 25 درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند.

¹ Indirect Tensile Strength

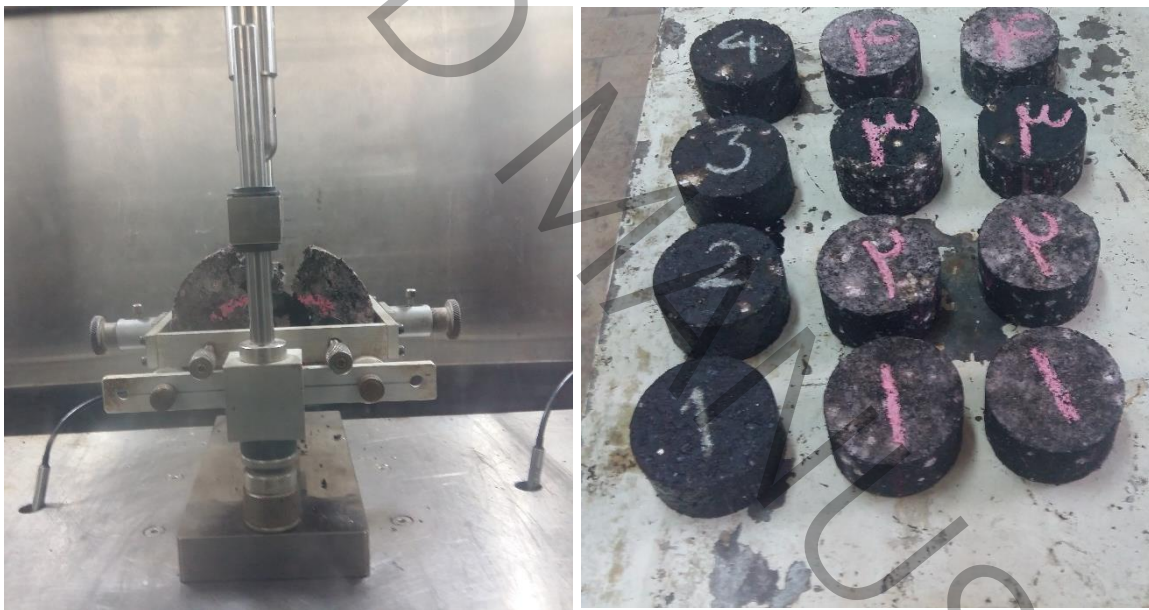
گیرند. همه نمونه ها تحت با فشاری با نرخ تغییر شکل ۵۰ میلیمتر در دقیقه قرار می گیرند و حداکثر بار قابل تحمل (P) اندازه گیری می شود. شکل ۷، تعدادی از نمونه ها و طریقه انجام آزمایش کشش غیر مستقیم را در این تحقیق نشان می دهد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها (ITS) از رابطه (۱) بدست می آید [25-28]:

$$ITS = \frac{2P}{\pi.t.D} \quad (1)$$

که در آن، ITS مقاومت کششی بر حسب کیلوپاسکال، P حداکثر بار بر حسب نیوتن، D قطر نمونه ها و t ضخامت نمونه ها بر حسب میلیمتر است. مقاومت رطوبتی نمونه های آسفالتی با استفاده از پارامتری به نام TSR یا نسبت مقاومت کششی کنترل می شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$TSR = \frac{ITS_{\text{اشباع}}}{ITS_{\text{خشک}}} \times 100 \quad (2)$$

که منظور از ITS اشباع، مقاومت کششی نمونه هایی است که تحت شرایط ذوب و یخ بستن قرار گرفته اند و منظور از ITS خشک یا غیراشباع، نمونه هایی است که فقط در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته اند. بر طبق استاندارد حداقل مقدار TSR بایستی ۸۰ درصد باشد تا معیار حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی کنترل گردد [25-28]:



شکل ۷: نمونه های استوانه ای مخلوط آسفالتی و دستگاه تعیین ITS

Figure 7- Cylindrical samples of asphalt mixture and ITS device

۳-۴- آزمایش ویل تراک هامبورگ برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی

تغییر شکل دائمی که با نام شیارشدگی هم شناخته می شود ناشی از تجمع تغییر شکل بازیابی نشده تحت تکرار بارهای محوری در لایه های روسازی بخصوص در لایه آسفالتی می باشد [29]. آزمایش تعیین مقاومت شیارشدگی نمونه های آسفالتی مختلف توسط دستگاه شیارافتادگی ویل تراک هامبورگ و مطابق استاندارد AASHTO T324 بر روی نمونه های استوانه ای انجام پذیرفت [30]. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت بر روی سطح نمونه به صورت رفت و برگشتی حرکت می کند و نمونه در شرایط خشک یا غرقاب مورد آزمایش قرار می گیرد. چرخ بارگذاری دستگاه به قطر ۲۰ سانتی متر و پهنای ۵ سانتی متر مطابق شکل ۸ است.



شکل ۸: دستگاه شیارافتادگی ویلتراک هامبورگ

Figure 8- Image of the Hamburg wheel track rutting machine

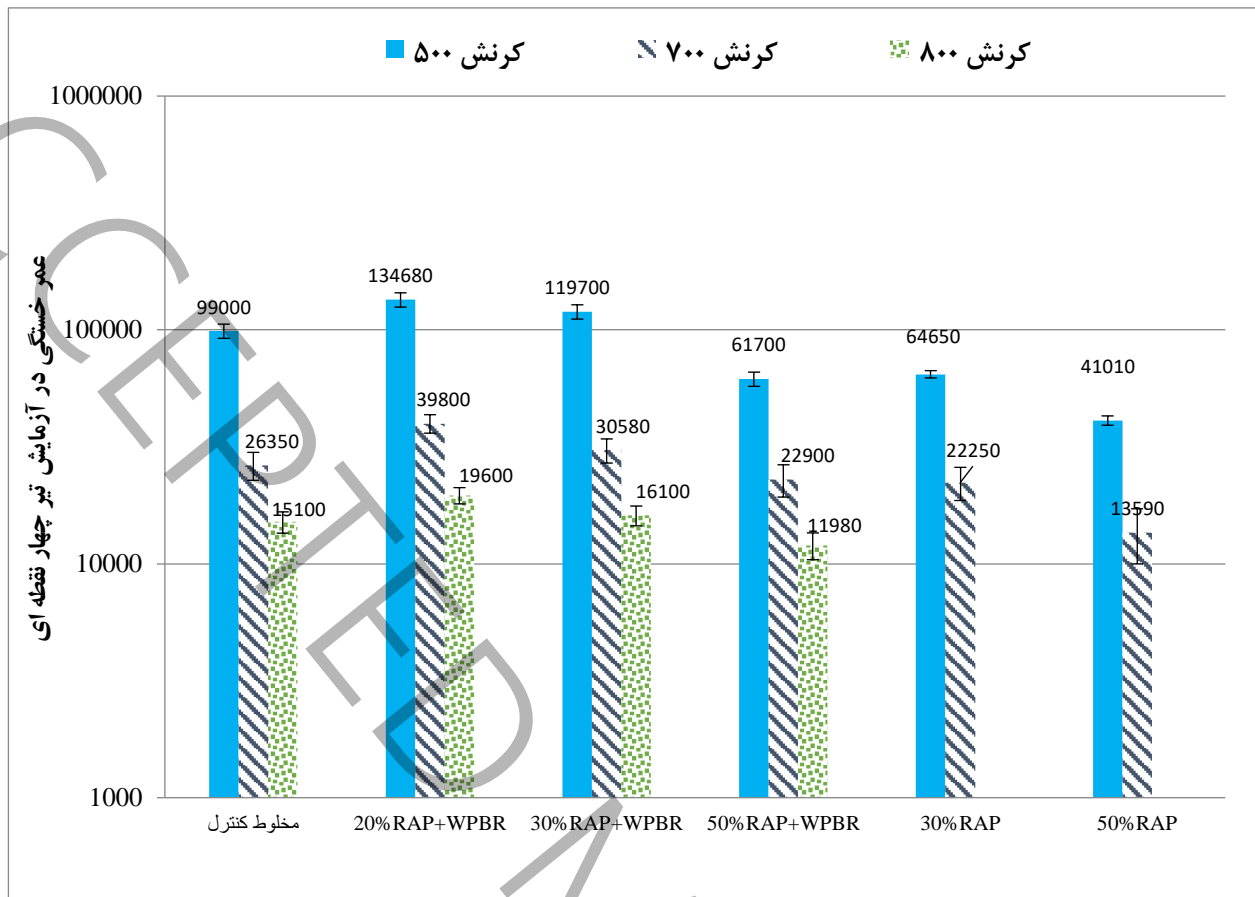
برای انجام آزمایش؛ نمونه آسفالتی در شرایط خشک، دمای ۵۵ درجه سانتیگراد، بار چرخ ۷۰۰ نیوتن و سرعت حرکت رفت و برگشتی ۵۰ عبور در دقیقه، تحت ۱۰۰۰۰ رفت و برگشت چرخ تحت بارگذاری دستگاه شیارافتادگی قرار گرفت [30]. مقدار عمق شیار در هر نمونه بر حسب میلیمتر اندازه گیری و گزارش شد.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- نتایج آزمایش تیر خمشی چهارنقطه ای خستگی:

نتایج متوسط عمر خستگی ۵۰ درصد (Nf50) برای نمونه های مختلف آسفالتی با درصد های مختلف RAP در سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین بدست آمد و در شکل ۹ با همدیگر مقایسه شده اند. این نتایج در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و توسط دستگاه خمشی چهارنقطه ای صورت گرفته است. همانطور که از نتایج پیداست، مخلوط های آسفالتی دارای ۲۰ و ۳۰ درصد RAP حاوی قیر اصلاح شده با WPBR دارای عمر خستگی بالاتری نسبت به مخلوط کنترل می باشند. عمر خستگی مخلوط آسفالتی دارای ۵۰ درصد RAP حاوی قیر اصلاح شده با WPBR نسبت به مخلوط کنترل کاهش پیدا کرده است. با توجه به روند تغییرات عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در شکل ۹، می توان نتیجه گرفت که استفاده از پلی بوتادین رابر پسماند در مخلوط های آسفالتی می تواند مشکل کاهش مقاومت خستگی مخلوط های حاوی RAP را تا درصد های RAP بیش از ۳۰ درصد و کمتر از ۵۰ درصد (حدوداً ۴۰ درصد) حل کند. این در حالیست که بسیاری از محققین دریافته بودند که با افزودن مصالح RAP به آسفالت، مقاومت خستگی نسبت به مخلوط کنترل (بدون RAP) کاهش پیدا می کند. از طرفی استفاده از ضایعات PBR می تواند به عنوان یک راهکار مناسب (به دلیل هزینه کم، ویژگی های مکانیکی خوب، تولید ضایعات زیاد این نوع پلیمرها و حفظ محیط زیست) برای افزایش مقاومت خستگی مخلوط های آسفالتی حاوی درصد RAP کمتر از ۵۰ درصد معرفی شود.

به منظور تاثیر عملکرد پلیمر پسماند PBR به صورت مجزا بر مخلوط های آسفالتی حاوی RAP، نتایج مربوط به عمر خستگی مخلوط های آسفالتی حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد RAP را بدون هیچ گونه افزودنی به دست آورده و در شکل ۹ افزوده شده است.



شکل ۹: نتایج عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۰ درجه

Figure 9- Fatigue life results of asphalt mixtures at 20°C

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با مقایسه عمر خستگی مخلوط‌های 30%RAP+WPBR و 50%RAP+WPBR به ترتیب با 30%RAP و 50%RAP می‌توان نتیجه گرفت که افزودن پلیمر پسماند در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰ درصد RAP توانسته است عمر خستگی را در کرنشهای ۵۰۰ و ۷۰۰ به ترتیب ۸۵ درصد و ۳۸ درصد و در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد RAP توانسته است عمر خستگی را در کرنشهای ۵۰۰ و ۷۰۰ به ترتیب ۵۰ درصد و ۶۸ درصد نسبت به مخلوط‌های حاوی RAP بدون پلیمر PBR افزایش دهد.

۲-۵- نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم برای ارزیابی حساسیت رطوبتی

سنگ‌دانه‌ها و قیر اجزای اصلی مخلوط‌های آسفالتی هستند و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آنها مستقیماً بر حساسیت رطوبتی تأثیر می‌گذارد. رطوبت به دو صورت بر روی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر منفی دارد. اولین حالت اثر بر روی قیر موجود در مخلوط است که قیر در اثر رطوبت مقداری از استحکام چسبندگی (cohesive) خود را از دست می‌دهد. ثانیاً آب به فضاهای بین فیلم نازک بین قیر و سنگ‌دانه‌ها نفوذ کرده و باعث از بین رفتن مقاومت چسبندگی (adhesion) و در نهایت جداشدن سنگ‌دانه‌ها از قیر می‌شود. مقاومت چسبندگی، یکی از ویژگی‌های ضروری مخلوط‌های آسفالتی است که به طور قابل توجهی بر کیفیت و دوام روسازی تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده است که با آزمایش لاتمن اصلاح شده این مورد بررسی گردد [20].

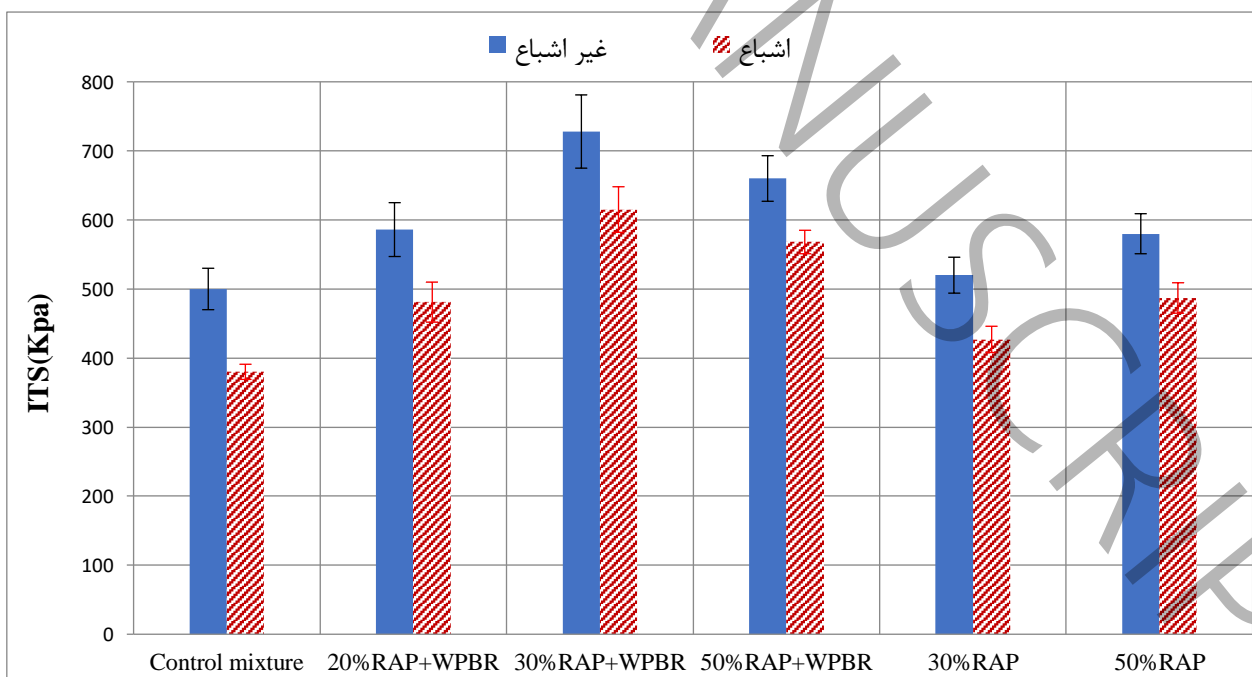
شکل ۱۰، متوسط نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نمونه‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق را در دو شرایط اشباع و غیر اشباع در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی حاوی RAP و قیر اصلاح شده با WPBR بیشتر از مقاومت کششی مخلوط کنترل در دو شرایط اشباع و

غیر اشباع است. از آنجاییکه مقاومت کشش غیر مستقیم هم در دمای متوسط نشان دهنده رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی می باشد، پس می توان نتیجه گرفت که وجود WPBR توانسته اثر منفی حضور مصالح RAP را در کاهش مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی خنثی کند.

افزایش پلیمر پسماند در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰ درصد RAP باعث بیشترین مقاومت کشش غیر مستقیم شده است. این امر نشان دهنده مقاومت کششی مناسب در دمای میانی می باشد. از طرفی با مقایسه با نتایج آزمایش تیر چهار نقطه ای خستگی (شکل ۹)) نیز مشاهده می شود که مخلوط آسفالتی حاوی ۳۰ درصد RAP که با پلیمر پسماند ترکیب شده است دارای عمر خستگی نسبتاً بالایی می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزودن پلیمر پسماند به مخلوط های آسفالتی تا ۳۰ درصد RAP نقش بسزایی در افزایش قابل توجه مقاومت خستگی در دمای میانی دارد.

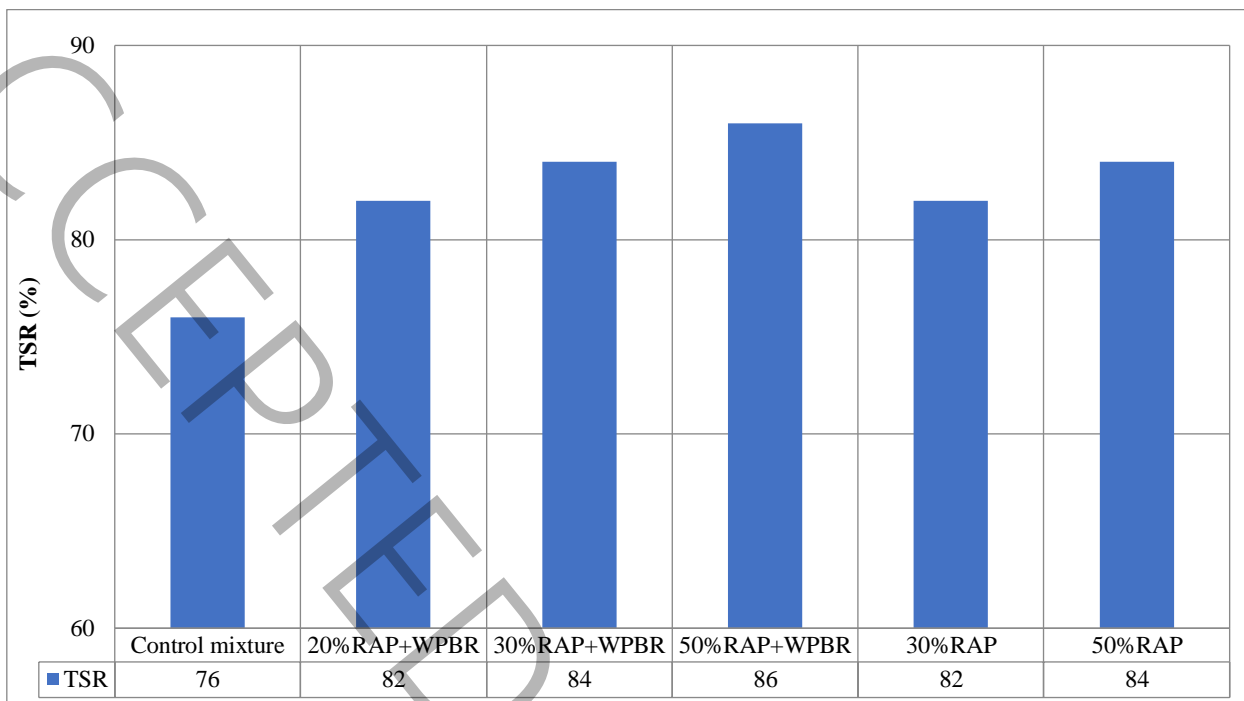
نسبت TSR که در معادله (۲)، به آن اشاره شده است به عنوان یک پارامتر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی به کار برده می شود. هرچه مقدار TSR بیشتر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر مخلوط در برابر رطوبت می باشد. شکل ۱۱، مقدار TSR همه مخلوط های آسفالتی را نشان می دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می شود، با افزایش درصد RAP مقدار TSR بیشتر شده است. بنابراین ترکیب قیر اصلاح شده با WPBR به همراه مصالح RAP اثر مثبتی بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با مخلوط کنترل داشته است.

در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP، با افزایش درصد قیر بازیافتی به دلیل پیوستگی که از قبل بین مصالح سنگی و قیر سالخورده وجود داشته است، مقاومت چسبندگی نمونه های قیری نیز افزایش می یابد. اما در این تحقیق با افزودن پلیمر پسماند به مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP مشاهده شده که نسبت TSR نسبت به مخلوط‌های حاوی RAP بدون پلیمر پسماند افزایش داشته است و این امر نشان دهنده اثر مثبت این نوع پلیمر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP می باشد. بنابراین در شکل ۱۱، با مقایسه نتایج TSR در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰ درصد و ۵۰ درصد RAP، در دو حالت بدون پلیمر پسماند و با پلیمر پسماند PBR می توان اثر افزودنی (PBR) را در بهبود حساسیت رطوبتی به وضوح دید.



شکل ۱۰: نتایج مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی مختلف در دو شرایط اشباع و غیر اشباع

Figure 10- ITS results of the different asphalt mixtures in conditioned and unconditioned samples

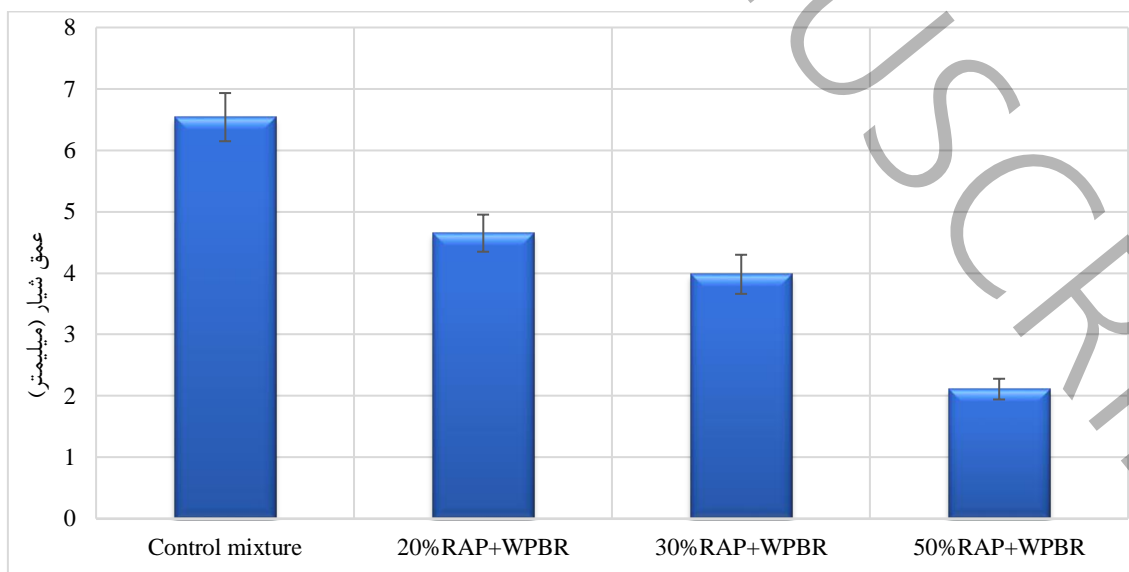


شکل ۱۱: نتایج نسبت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی مختلف

Figure 11- TSR results of the different asphalt mixtures

۵-۳ نتایج آزمایش ویلتراک هامبورگ برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی:

شکل ۱۲، متوسط عمق شیار مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف RAP که با قیر پلیمری ترکیب شده اند را در مقایسه با مخلوط کنترل نشان می‌دهد. این نتایج در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد و توسط آزمایش ویلتراک هامبورگ بدست آمده است. همانطور که از نتایج پیداست، با افزایش درصد RAP، عمق شیار مخلوط آسفالتی کاهش پیدا کرده است. بنابراین ترکیب مصالح RAP و قیر اصلاح شده با عملکرد مثبتی در افزایش مقاومت شیارشدگی داشته است، طوریکه با افزودن ۵۰ درصد RAP، عمق شیار مخلوط به مقدار ۷۰ درصد نسبت به عمق شیار مخلوط کنترل کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۲: عمق شیار مخلوط‌های آسفالتی مختلف به همراه ضریب تغییرات آنها

Figure 12- Rut depth of different asphalt mixtures and their coefficient of variation

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، استفاده از یک پلیمر ضایعاتی به نام PBR (باتوجه به یک راهکار مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست) در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP مورد ارزیابی قرار گرفته است. رفتار مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد RAP در برابر پدیده خستگی، حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای، کشش غیر مستقیم و ویلتراک هامبورگ نتایج زیر بدست آمد:

- باتوجه به نتایج آزمایش خستگی تیرچه چهار نقطه‌ای مشخص شد که وجود پلیمر ضایعاتی PBR باعث بهبود عملکرد خستگی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی بیش از ۳۰ درصد (تقریباً ۴۰ درصد) در مقایسه با مخلوط کنترل آسفالت داغ بدون RAP شد.
- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی حاوی RAP و قیر اصلاح شده با WPBR بیشتر از مقاومت کششی مخلوط کنترل در دو شرایط اشباع و غیراشباع است.
- با مقایسه مقادیر TSR که نشان‌دهنده مقاومت مخلوط‌ها در برابر نفوذ آب است، مشخص شد که ترکیب قیر اصلاح شده با WPBR به همراه مصالح RAP باعث افزایش نسبت TSR و در نتیجه اثر مثبتی بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با مخلوط کنترل داشته است.
- نتایج عمق شیار به دست آمده در مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که استفاده از قیر اصلاح شده با پلیمر ضایعاتی مذکور در کنار مصالح RAP، همچنان اثر کاهشی در عمق شیار مخلوط‌ها داشته است.
- بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها می‌توان عنوان کرد عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح بازیافتی (RAP و پلیمر پسماند) بسیار مطلوب است و باتوجه به اثرات مثبت زیست‌محیطی و اقتصادی این نوع مخلوط‌ها، از آنها می‌توان در بخش زیادی از راه‌های کشور استفاده نمود.
- در این تحقیق فقط اثر پلیمر پسماند PBR به تنهایی بر مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP بررسی شد. با مقایسه نتایج آزمایش تیرچه خمشی خستگی و لاتمن اصلاح شده در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰ درصد و ۵۰ درصد RAP، در دو حالت بدون پلیمر پسماند و با پلیمر پسماند PBR، مشخص شد که افزودن پلیمر پسماند PBR به تنهایی بر مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP باعث افزایش مقاومت خستگی و بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تا ۵۰ درصد RAP شده و تاثیر منفی هم بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP ندارد.

مراجع

- [1] W.S. Mogawer, A.J. Austerman, R. Kluttz, S. Puchalski, Using polymer modification and rejuvenators to improve the performance of high reclaimed asphalt pavement mixtures, Transportation research record, 2575(1) (2016) 10-18.
- [2] T.B. Moghaddam, H. Baaj, The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review, Construction and Building Materials, 114 (2016) 805-816.
- [3] L. Porot, D. Broere, M. Wistuba, J. Grönniger, Asphalt and binder evaluation of asphalt mix with 70% reclaimed asphalt, Road Materials and Pavement Design, 18(sup2) (2017) 66-75
- [4] M. Pasetto, N. Baldo, Fatigue performance of recycled hot mix asphalt: A laboratory study, Advances in Materials Science and Engineering, 2017(1) (2017) 4397957.
- [5] J. Li, F. Ni, Y. Huang, L. Gao, New additive for use in hot in-place recycling to improve performance of reclaimed asphalt pavement mix, Transportation Research Record, 2445(1) (2014) 39-46.

- [6] A. Behroozikhah, S.H. Morafa, S. Aflaki, Investigation of fatigue cracks on RAP mixtures containing Sasobit and crumb rubber based on fracture energy, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 526-532.
- [7] M. Zaumanis, R.B. Mallick, L. Poulidakos, R. Frank, Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 71 (2014) 538-550.
- [8] H. Nabizadeh, H.F. Haghshenas, Y.-R. Kim, F.T.S. Aragão, Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures, *Construction and Building Materials*, 152 (2017) 65-73.
- [9] B.H. Dinh, D.-W. Park, T.H.M. Le, Effect of rejuvenators on the crack healing performance of recycled asphalt pavement by induction heating, *Construction and building materials*, 164 (2018) 246-254.
- [10] H. Zhu, G. Xu, M. Gong, J. Yang, Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator, *Construction and building materials*, 147 (2017) 117-129.
- [11] M. Ameri, A. Mansourkhaki, D. Daryae, Evaluation of fatigue behavior of high reclaimed asphalt binder mixes modified with rejuvenator and softer bitumen, *Construction and Building Materials*, 191 (2018) 702-712.
- [12] M. Ameri, A. Mansourkhaki, D. Daryae, Evaluation of fatigue behavior of asphalt binders containing reclaimed asphalt binder using simplified viscoelastic continuum damage approach, *Construction and Building Materials*, 202 (2019) 374-386.
- [13] D. Daryae, M. Ameri, and A. Mansourkhaki, "Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 235, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117516.
- [14] D. Daryae, M. Habibpour, S. Gulzar, B.S. Underwood, Combined effect of waste polymer and rejuvenator on performance properties of reclaimed asphalt binder, *Construction and Building Materials*, 268 (2021) 121059.
- [15] S. Kim, G.A. Sholar, T. Byron, J. Kim, Performance of polymer-modified asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement, *Transportation research record*, 2126(1) (2009) 109-114.
- [16] Z. Jwaida, A. Dulaimi, M.A.O. Mydin, Y.O. Özkılıç, R.P. Jaya, A. Ameen, The use of waste polymers in asphalt mixtures: bibliometric analysis and systematic review, *Journal of Composites Science*, 7(10) (2023) 415.
- [17] S. Mustafa, M.A. Hameed, A. Dulaimi, Evaluation of the properties of modified local asphalt binder by using StyREnE butadiEnE RubbER (SbR) oR low-dEnSity polyEthylEnE (ldpE), *Scientific Review Engineering and Environmental Studies (SREES)*, 31(3) (2022) 190-202.
- [18] A. Mansourkhaki, M. Ameri, D. Daryae, Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder, *Construction and Building Materials*, 203 (2019) 83-94.
- [19] A. Mansourkhaki, M. Ameri, M. Habibpour, D. Daryae, The effect of polybutadiene rubber (PBR) on chemical and rheological properties of the binder including RAP, *Construction and Building Materials*, 244 (2020) 118320.
- [20] D. Daryae, M. Vamegh, Feasibility study for evaluating the moisture resistance of asphalt mixtures containing RAP using pull-off test, *Journal of Testing and Evaluation*, 50(4) (2022) 2103-2115.
- [21] Code No. 234, Iran Highway Asphalt Paving, in, Ministry of Roads and Urban Development, 2011.
- [22] ASTM D1559-89, Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus, in: *Annual Book of Astm Standards*. Philadelphia PA: American Society for Testing and Materials, America, 1998.
- [23] AASHTO T321, Determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending, in: *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): Washington, DC, USA, 2011.*
- [24] M. Vamegh, M. Ameri, S.F.C. Naeni, Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified

by SBR/PP polymer blends and SBS, *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 202-214.

- [25] AASHTO T283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, in: *American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA*, 2014.
- [26] M. Ameri, M. Vamegh, S.F.C. Naeni, M. Molayem, Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik, Zycotherm and hydrated lime, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 958-965.
- [27] M. Vamegh, M. Ameri, S.F.C. Naeni, Experimental investigation of effect of PP/SBR polymer blends on the moisture resistance and rutting performance of asphalt mixtures, *Construction and building materials*, 253 (2020) 119197.
- [28] M. Ameri, S. Nobakht, K. Bemana, H. Rooholamini, M. Vamegh, Effect of nanoclay on fatigue life of hot mix asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 34(11-12) (2016) 1021-1025.
- [29] R. Babagoli, M. Vamegh, P. Mirzababaei, Laboratory evaluation of the effect of SBS and Lucobite on performance properties of bitumen, *Petroleum Science and Technology*, 37(3) (2019) 255-260.
- [30] AASHTO T324-19, "Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)," *Washington, DC, USA.*, 2013.

Performance Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Modified with Waste Polybutadiene Rubber

Daryoosh Daryae^{a*1}, Mostafa Vamegh^b

^a Dept. of Civil Eng., Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran

^b Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

In this research, the effect of waste polybutadiene rubber (PBR) has been investigated in the performance evaluation of asphalt mixtures containing RAP. Different percentages of RAP, including 20, 30, and 50%, were selected to prepare the asphalt mixture. To prepare polymer-modified bitumen, bitumen 60/70 was mixed with 5% by weight of waste PBR polymer and then added to asphalt mixtures containing different percentages of RAP. In this study, four-point bending beam, modified Lottman and Hamburg Wheel-Track tests were performed to evaluate the fatigue behavior, moisture susceptibility, and the rutting resistance of asphalt mixtures containing RAP, respectively. The results showed that the presence of utilized waste polymer significantly improved the fatigue behavior of asphalt mixtures containing 20 and 30% RAP compared to the control mixture. Also, the use of this polymer can be used in asphalt mixtures with a RAP percentage of less than 50% (about 40%) without any concern about reducing the fatigue resistance of asphalt. Furthermore, the results showed that by using waste PBR in asphalt mixtures containing RAP, the resistance of the mixtures against moisture susceptibility has increased significantly compared to the control mixture. The results of the Hamburg Wheel-track test also showed that the combination of RAP materials and used waste polymer could reduce the rut depth by 70% in comparison with the control mixture.

KEYWORDS

WASTE POLYBUTADIENE RUBBER, RAP MATERIAL, FATIGUE, MOISTURE SUSCEPTIBILITY, RUTTING RESISTANCE

¹ Corresponding Author: Email: D.Daryae@malayeru.ac.ir