

تاثیر استفاده از فیلر خرده آسفالت بازیافتی بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی داغ

مقاله علمی - پژوهشی

دانیال شیروانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا سرکار*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sarkar@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

صفحه ۳۴۰-۳۲۳

چکیده

خرده آسفالت بازیافتی (RAP) به دلیل پتانسیل استفاده مجدد در مخلوط‌های آسفالتی، هزینه‌های اقتصادی را کاهش داده و اثرات زیست‌محیطی را محدود می‌کند. با وجود مطالعات متعدد درباره‌ی تأثیر درصدهای مختلف RAP بر عملکرد مخلوط آسفالتی داغ، تاکنون پژوهشی به بررسی نقش RAP به عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی نیرداخته است. بنابراین به منظور افزایش بازیافت RAP در مخلوط‌های آسفالتی، این پژوهش رویکرد جدیدی را با استفاده از RAP به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی داغ بررسی می‌نماید. در مرحله اول فیلر خرده آسفالت بازیافتی (فیلر RAP) به طور کامل جایگزین فیلر کنترل گردید و درصد قیر بهینه طبق استاندارد مارشال تعیین شد. سپس خواص مکانیکی مخلوط حاوی فیلر RAP با استفاده از آزمایش‌های خمش نیم‌دایره (SCB)، خستگی کشش غیرمستقیم، ویلترک هامبورگ و حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج با مخلوط شاهد مقایسه گردید. یافته‌ها نشان داد که استفاده از فیلر RAP باعث بهبود معناداری در خواص مکانیکی و همچنین دوام مخلوط آسفالتی می‌گردد. به طوری که پارامترهای انرژی شکست و عمر خستگی به ترتیب ۴۴٪ و ۵۰٪ افزایش یافت و نرخ گسترش میکروتکرک‌ها ۶۰٪ کاهش یافت. همچنین شاخص TSR ، ۲٪ افزایش را نشان داد که بیانگر بهبود دوام مخلوط آسفالتی در برابر آسیب رطوبتی است. با توجه به نتایج آزمایش HWT افزودن فیلر RAP تأثیر معناداری در عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی نشان نداد. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که فیلر RAP خواص مکانیکی و حساسیت رطوبتی HMA را بهبود می‌بخشد. بنابراین استفاده از فیلر RAP در HMA می‌توان پیشنهاد نمود.

واژه‌های کلیدی: فیلر خرده آسفالت بازیافتی، خرده آسفالت بازیافتی، مکانیک شکست، خستگی، ترک حرارتی

۱- مقدمه

می‌کند، بلکه اثرات نامطلوبی بر محیط زیست نیز دارد و باعث هدر رفتن منابع می‌شود (Tarsi et al., 2020). محققان بسیاری تأثیر استفاده از درصدهای مختلف خرده آسفالت بازیافتی را بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی داغ بررسی کرده‌اند و درصد بهینه RAP مورد استفاده در مخلوط را تعیین

توسعه راه‌ها، سنگدانه‌ها و قیر زیادی را مصرف می‌کند که رو به اتمام است و در نتیجه هزینه مصالح را افزایش می‌دهد (Raju & Katla, 2024). تعمیر و نگهداری راه‌ها مقدار زیادی خرده آسفالت تولید می‌کند که ناشی از تراش رویه مضمحل شده راه است که نه تنها مقدار زیادی زمین را اشغال

باشد (Han et al., 2019; Ma et al., 2022). به طور کلی RAP تا ۳۰ درصد نتایج رضایت بخشی را همانطور که محققان گزارش دادند ارائه می‌دهد (Pradhan et al., 2023). کاربرد محدود مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با درصد‌های RAP بالا از عوامل متعددی ناشی می‌شود، از جمله تنوع قابل توجه مصالح RAP، کاهش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌های خستگی و حرارتی و همچنین دست‌ورالعمل اختلاط توسعه نیافته می‌باشد (Li et al., 2025). قیر موجود در RAP به دلیل از بین رفتن مواد فرار و اکسیداسیون پیر شده و در نتیجه یک قیر شکننده و سفت ایجاد می‌شود که بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی تأثیر منفی می‌گذارد و در عین حال بزرگ‌ترین چالش در افزایش مقدار RAP در مخلوط آسفالتی به بیش از ۳۰ درصد است (Raju & Katla, 2024). به همین دلیل نگرانی اولیه هنگام استفاده از RAP در مخلوط آسفالتی، آسیب‌پذیری آن در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی است (Bérubé et al., 2023; Muñoz, 2021). علاوه بر این، کنترل کیفیت ضعیف RAP منجر به تنوع بالا در عملکرد آن می‌شود، به ویژه زمانی که محتوای RAP بالا باشد و در نتیجه استفاده از RAP را محدود می‌کند تا از مقدار ۱۵ تا ۳۰ درصد وزنی در HMA فراتر نرود (McDaniel & Anderson, 2001; Tarsi et al., 2020; West et al., 2009). با این حال نرخ پایین بازیافت RAP در مخلوط آسفالتی منجر به تجمع و دفن بیش از حد مصالح RAP می‌شود و نمی‌توان ارزش پایداری RAP را در بازیافت ارتقا داد (Ma et al., 2022). بنابراین یافتن رویکردهای جدید برای استفاده هر چه بیشتر از RAP و بازیافت آن در مخلوط‌های آسفالتی ضروری است. با بررسی مطالعات گذشته، مشخص شد که هیچ مطالعه‌ای تاکنون به بررسی نقش RAP به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی نپرداخته است. فیلر به عنوان بخشی از سنگدانه‌ها، نقاط تماس بین ذرات را فراهم می‌کند و به طور فعال به خواص حجمی و مقاومت مکانیکی مخلوط آسفالتی کمک می‌کند. علاوه بر این، ذرات فیلر معلق در قیر بر پاسخ رئولوژیکی ماده نهایی تأثیر می‌گذارد (De Pascale et al., 2024; Mukhtar et al., 2021). در یک HMA، فیلر (ذرات معدنی کوچک تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) حدود ۳ تا ۱۰ درصد از جرم کل سنگدانه‌ها را تشکیل می‌دهد، اما از نظر حجمی، حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد

کرده‌اند. استفاده فعلی از مصالح RAP در مخلوط‌های بازیافتی محدود است و معمولاً از ۳۰ درصد تجاوز نمی‌کند که به طور قابل توجهی مزایای اقتصادی و زیست محیطی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را محدود می‌کند (Xing et al., 2023). تاباکوویچ و همکاران نشان دادند مخلوط حاوی ۳۰ درصد RAP در مقایسه با مخلوط شاهد، ۷ درصد افزایش در سفتی، ۹۰ درصد کاهش در ناحیه ترک و ۳۳ درصد افزایش در تعداد چرخه‌های شکست را نشان می‌دهد. با این حال نسبت مقاومت کششی به ترتیب به ۹۴ درصد برای RAP و ۸۸ درصد برای RAP ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که این هنوز بالاتر از آستانه بحرانی ۷۵ یا ۸۰ درصد است، اما روند نزولی باعث نگرانی است. همچنین گنجاندن ۳۰ درصد RAP در مخلوط، عملکرد خستگی مخلوط را بهبود می‌بخشد (Tabaković et al., 2010). روجا و همکاران نشان دادند مخلوط آسفالتی حاوی درصد بیشتری از RAP (۳۵ درصد) دارای بالاترین مدول دینامیکی و مقاومت شیارشدگی است. با این حال، این مخلوط کمترین مقاومت در برابر شکست را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش نسبت RAP در مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت در برابر آسیب رطوبت بهبود یافت. این می‌تواند به دلیل پیوند قوی بین قیر قدیمی و سنگدانه باشد. قیر پیر شده RAP تغییرات شدیدی را در رفتار مخلوط به دلیل تغییرات دما نشان داد. در نتیجه مشخص شد که افزودن RAP تا ۲۰ درصد تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط ندارد (Rojá et al., 2021) و برای استفاده در مخلوط آسفالتی مناسب است (Pradhan et al., 2023). زالغوت و همکاران مخلوط‌های حاوی ۱۵ و ۲۵ درصد RAP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن ۱۵ و ۲۵ درصد RAP به مخلوط تأثیر قابل توجهی بر افزایش سفتی مخلوط ندارد، اما مقاومت شیارشدگی را بهبود می‌بخشد، عملکرد ترک خوردگی قابل مقایسه‌ای دارد و مقاومت در برابر آسیب رطوبت قابل قبولی دارد (Zalghout et al., 2022). نتایج یک مطالعه دیگر نشان داد که با افزایش درصد RAP، خواص مکانیکی و خواص دمای بالا مخلوط آسفالتی بازیافتی بهبود می‌یابد و خواص دمای پایین و ویژگی‌های حساسیت به رطوبت ابتدا افزایش یافته و سپس تضعیف می‌شوند و بهترین عملکرد زمانی به دست می‌آید که مقدار RAP به ترتیب ۲۰ و ۴۰ درصد

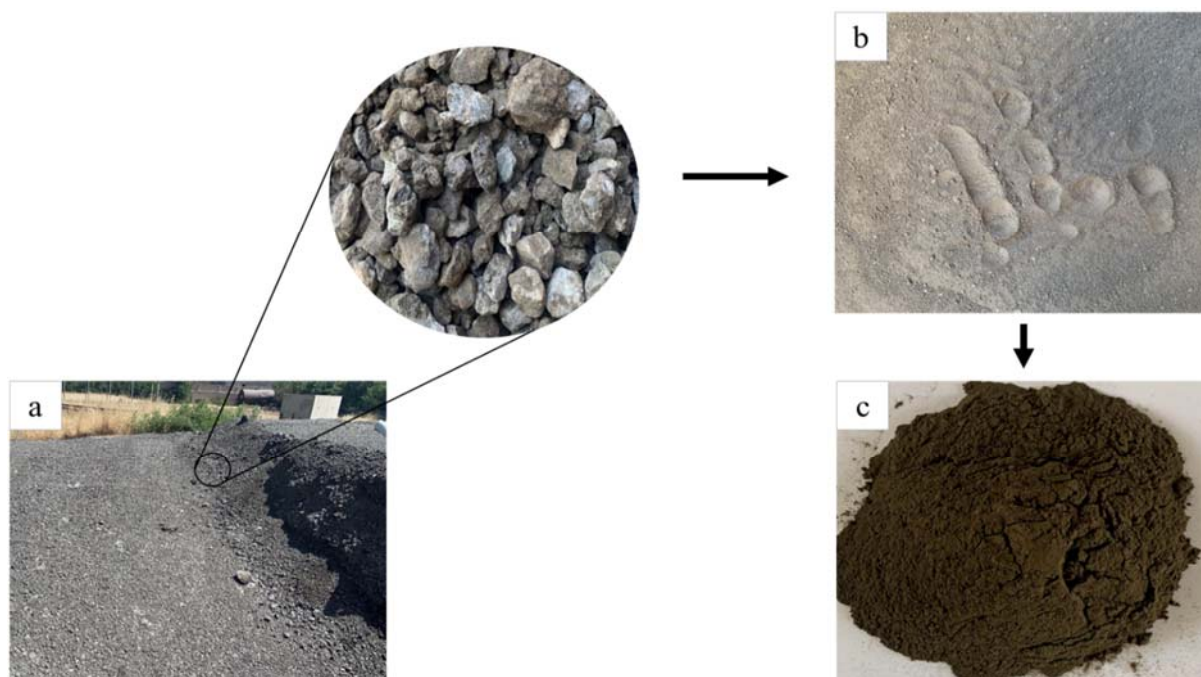
میزان این ضایعات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، بلکه ممکن است مصرف سنگدانه های طبیعی و فیلر را به عنوان منابع تجدید ناپذیر کاهش دهد. بررسی مطالعات نشان می دهد که تاکنون پژوهشی به بررسی نقش *RAP* به عنوان فیلر در مخلوط های آسفالتی نیرداخته است. بنابراین این تحقیق به منظور افزایش بازیافت *RAP* در مخلوط آسفالتی و در نتیجه حفظ منابع تجدید ناپذیر، با یک رویکرد جدید، به بررسی تأثیر *RAP* به عنوان فیلر در *HMA* می پردازد. در فاز اول فیلر *RAP* به طور کامل جایگزین فیلر کنترل می گردد و درصد قیر بهینه هر کدام با استفاده از استاندارد مارشال تعیین می شود. سپس در فاز دوم آزمایش های خمش نیم دایره، کشش غیرمستقیم، ویلترک هامبورگ و حساسیت رطوبتی برای ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط حاوی فیلر *RAP* انجام می گیرد و در نهایت عملکرد آن با مخلوط شاهد (حاوی فیلر سیلیسی) مقایسه می شود.

۲- مصالح

۲-۱- فیلر خرده آسفالت بازیافتی (فیلر *RAP*)

در پروسه به دست آوردن فیلر *RAP* با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله ای (Ball mill)، ابتدا *RAP* به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرد. این فرایند به دلیل حذف رطوبت *RAP* به منظور جلوگیری از چسبندگی پودر *RAP* به گلوله های دستگاه بالمیل انجام می شود. در مرحله بعد *RAP* درون دستگاه بالمیل ریخته شده و به مدت ۳۰ دقیقه تحت فرایند خردایش قرار می گیرد. در آخر خروجی حاصله از فرایند خردایش از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و در نتیجه فیلر *RAP* به این صورت به دست می آید. شکل ۱ به ترتیب فرایند تبدیل *RAP* به پودر *RAP* و فیلر *RAP* را نشان می دهد.

را شامل می شود (Rondón-Quintana et al., 2025). با وجود درصد نسبتاً کم، فیلر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و دوام مخلوط های آسفالتی دارد (Jayvant Choudhary et al., 2018; Taherkhani & Bayat, 2022). فیلر یکی از مصالح اصلی در ساخت مخلوط آسفالتی است و به طور مداوم مورد استفاده قرار می گیرد، زیرا مستقیماً از منابع طبیعی استخراج می شود. تهیه فیلر معدنی پرهزینه بوده و اثرات زیست محیطی قابل توجهی دارد (مانند تغییر در اکوسیستم، از بین رفتن پوشش گیاهی و لایه های نگهدارنده آب، پایین رفتن سطح آب های زیرزمینی و غیره) (Belayali et al., 2023; Rondón-Quintana et al., 2025). در نتیجه، یافتن جایگزین های مناسب برای فیلر های معدنی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. محققان متعددی عملکرد مخلوط های آسفالتی تهیه شده با انواع فیلر های بازیافتی را بررسی کرده اند و نتایج امیدوارکننده ای را دریافت کرده اند. محققان ضایعات مختلف مربوط به بخش های ساختمانی، صنایع، کشاورزی و ... را به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی مورد بحث قرار داده اند، مانند پودر آجر بازیافتی (Arabani et al., 2017; Taherkhani & Bayat, 2022). برنج (Choudhary et al., 2020b; Sargin et al., 2013)، شیشه بازیافتی (Arabani et al., 2017; J, 2021; Choudhary et al., 2018; Choudhary et al., 2021)، سرمایه گذاری ضایعاتی (Shamsaei et al., 2020)، باطله مس (Choudhary et al., 2020a) که همگی نتایج امیدوارکننده ای در مقدار بهینه خود ارائه داده اند. در صنعت مدرن، حذف ضایعات و حفاظت از منابع طبیعی به یکی از دغدغه های اصلی امروزه تبدیل شده است (Wozuk et al., 2019). استفاده از مصالح زائد به عنوان سنگدانه یا فیلر مخلوط آسفالتی می تواند یک روش عملی برای تولید پاک تر باشد. از این رو *RAP* را می توان در مخلوط آسفالتی برای بازیافت این مصالح استفاده کرد. این رویکرد نه تنها می تواند



شکل ۱. فرایند تبدیل RAP به فیلر RAP: (a) RAP، (b) پودر RAP، (c) فیلر RAP

۲-۲- قیر

به منظور ساخت مخلوط‌های آسفالتی در پژوهش حاضر از قیر ۷۰-۶۰ استفاده گردید. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات قیر

| استاندارد | نتایج | واحد | آزمایش |
|--------------|-------|------|------------------------------------------|
| ASTM - D5 | ۶۰/۷۰ | mm | نفوذ 25°C (۰/۱mm) |
| ASTM - D36 | ۵۳ | □ | نقطه نرمی |
| ASTM - D113 | ۱۰۰ | cm | شکل‌پذیری 25°C |
| ASTM - D92 | ۳۳۴ | - | نقطه اشتعال |
| ASTM - D70 | ۱/۰۱۸ | - | وزن مخصوص 25°C |
| ASTM - D2170 | ۳۷۴۰ | cst | وسیکوزیته کینماتیک 100°C |
| - | ۹۶۳ | cst | وسیکوزیته کینماتیک 120°C |
| - | ۳۴۷ | cst | وسیکوزیته کینماتیک 140°C |
| ASTM - D2042 | ۹۹/۷۱ | Wt % | حلالیت در تری کلرواتیلن |
| ASTM - D1754 | ۰/۰۴ | Wt % | از دست دادن در گرما (Loss on Heating) |
| - | ۷۴ | % | حفظ نفوذ پس از آزمایش کوره فیلم نازک |
| - | ۱۰۰ | cm | شکل‌پذیری بعد از آزمایش کوره لایه نازک |

۲-۳- مصالح سنگی

استفاده در این مطالعه در جدول ۲ گزارش شده است. در این مطالعه، دانه بندی مصالح سنگی بر اساس آیین نامه روسازی آسفالتی بزرگراه ایران کد-۲۳۴ (Development, 2011) تعیین گردید. جدول ۳ دانه بندی مخلوط آسفالتی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

از سنگدانه‌های سیلیسی به عنوان سنگدانه‌های درشت و ریز و همچنین فیلر استفاده شد. حداکثر اندازه سنگدانه‌های درشت مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر است. مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۴ (کوچکتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) به عنوان سنگدانه‌های ریز انتخاب شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی مورد

جدول ۲. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها

| حدود اتربرگ | ضریب نرمی | وزن مخصوص | جذب آب % | تطویل و تورق % | زاویه دار بودن در دو طرف % | سایش لس آنجلس % | ارزش ماسه ای % | آزمایش |
|----------------|-----------|-------------------|------------|----------------|----------------------------|-----------------|----------------|-----------|
| AASHTO-T89,T90 | AASHTO-M6 | AASHTO-T84,85,100 | ASTM-D4791 | ASTM-D5821 | AASHTO-T96 | AASHTO-T176 | استاندارد | |
| - | - | ۲/۶۷۹ | ۲/۳۱ | - | - | ۱۴/۸ | - | درشت دانه |
| N.P | ۳/۴۷ | ۲/۶۶۰ | ۲/۲۶ | ۱ | ۹۶ | - | ۵۶ | ریز دانه |
| N.P | - | ۲/۶۸۴ | - | - | - | - | - | فیلر |

جدول ۳. دانه بندی مخلوط آسفالتی

| اندازه الک (میلی‌متر) | حد بالا و پایین درصد عبوری (نشریه ۲۳۴) | درصد عبوری (%) |
|-----------------------|----------------------------------------|----------------|
| ۱۹ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| ۱۲/۵ | ۹۰-۱۰۰ | ۹۵ |
| ۴/۷۵ | ۴۴-۷۴ | ۵۷ |
| ۲/۳۶ | ۲۸-۵۸ | ۳۸ |
| ۰/۳ | ۵-۲۱ | ۱۱ |
| ۰/۰۷۵ | ۲-۱۰ | ۵ |

۳- طراحی مخلوط‌ها

مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل مخلوط شاهد و مخلوط حاوی فیلر RAP (مخلوط A) است. در مخلوط A، فیلر RAP به طور کامل جایگزین فیلر معدنی با همان نسبت (۵٪ وزنی کل سنگدانه) مورد استفاده در مخلوط شاهد می‌گردد. روش طراحی مخلوط مارشال، طبق استاندارد

ASTM D1559 برای یافتن درصد قیر بهینه مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سنجش استحکام مارشال و مقدار روانی مخلوط آسفالتی بر اساس استاندارد ASTM D6926 و محاسبه درصد هوای موجود در مخلوط آسفالتی متراکم با استفاده از استانداردهای ASTM D2041 (جهت محاسبه

حاوی فیلر RAP، تمامی فیلر معدنی در مصالح سنگی حذف شده و فیلر RAP به طور کامل جایگزین آن گردید. از این رو جهت ساخت مخلوط حاوی فیلر RAP، ابتدا مصالح سنگی روی الک شماره ۲۰۰ شسته شده و فیلر معدنی موجود در مصالح سنگی جدا گردید. سپس طبق پیشنهاد آسفالت-انستیتو-MS2 برای گرم کردن مصالح RAP، ابتدا فیلر RAP به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد داخل اون قرار گرفت (Institute, 2015). سپس فیلر RAP گرم شده به مصالح سنگی خشک و دانه بندی شده اضافه گردید و مجموع مصالح سنگی و فیلر RAP به همراه قیر از ۴ تا ۶ درصد وزنی از کل مخلوط در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط گردید و پس از مراحل شبیه سازی پیرشدگی و تراکم همانند مخلوط شاهد، پارامترهای مارشال مخلوط نظیر استحکام مارشال، مقدار روانی و درصد هوای مخلوط متراکم محاسبه گردید. مطابق جدول ۴، اگرچه درصد هوای مخلوط A بالاتر از مخلوط شاهد است، اما استحکام مارشال مخلوط حاوی فیلر RAP بیشتر از مخلوط شاهد است. افزایش استحکام مارشال در مخلوط A، به ذرات فیلر RAP موجود در قیرنسبت داده می‌شود که با وجود درصد فضای خالی بیشتر دارای استحکام و دوام بیشتری می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با جایگزینی فیلر RAP، مقداری روانی افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از خاصیت نرم‌کنندگی مخلوط توسط قیر در ذرات فیلر RAP باشد.

حداکثر وزن مخصوص تئوری آسفالت (G_{mm}) و استاندارد ASTM D2726 (جهت محاسبه وزن مخصوص آسفالت متراکم G_{mb}) انجام گرفت. برای به دست آوردن درصد قیر بهینه، سه نمونه مخلوط آسفالتی برای هر درصد قیر (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد) تهیه گردید. درصد قیر بهینه ۵/۵ درصد (وزن کل مخلوط) برای مخلوط شاهد و مخلوط حاوی فیلر RAP بر اساس پارامترهای مارشال (استحکام و روانی) و درصد فضای خالی مخلوط (VTM) به دست آمد. مقادیر استحکام مارشال، روانی و VTM هر کدام از مخلوط‌ها در درصد قیر بهینه در جدول ۴ نشان داده شده‌است. برای ساخت نمونه شاهد، ابتدا مصالح سنگی خشک در اون با دمای ۱۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت حرارت داده شد. سپس سنگدانه‌ها به همراه قیر با نسبت‌های مختلف (درصد وزنی از کل مخلوط) در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط گردید. سپس به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی اولیه (پیرشدگی حین ساخت و انتقال مخلوط آسفالتی)، مخلوط به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۴۳ درجه سانتی‌گراد داخل اون قرار گرفت. در مرحله بعد مخلوط آسفالتی در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد، توسط چکش مارشال استاندارد با اعمال ۷۵ ضربه در هر طرف (برای ترافیک سنگین) متراکم شده و در آخر پس از گذشت ۲۴ ساعت از تراکم، پارامترهای مارشال مخلوط نظیر استحکام مارشال، مقدار روانی و درصد هوای مخلوط متراکم محاسبه گردید. برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مارشال و درصد هوا مخلوط آسفالتی در درصد قیر بهینه

| نوع مخلوط | درصد قیر بهینه (%) | استحکام مارشال (کیلوگرم) | مقدار روانی (میلی متر) | درصد هوا در مخلوط متراکم (%) |
|------------|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| مخلوط شاهد | ۵/۵ | ۱۱۵۸ | ۴/۴۵ | ۴ |
| مخلوط A | ۵/۵ | ۱۱۸۲ | ۴/۹ | ۵/۱ |

۴-آزمایش‌های عملکردی

۴-۱-آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB)

رفتار ویسکوالاستیک آسفالت به تدریج کاهش می‌یابد. با این حال، در سطح معینی از دماهای آب و هوایی پایین، حالت تنش-کرنش آسفالت از ویسکوالاستیک به الاستیک تغییر

خواص مکانیکی و فیزیکی مخلوط آسفالتی به شدت به تغییرات دما بستگی دارد. تحت شرایط دمای محیط، تنش‌های حرارتی در روسازی ناشی از تغییرات دما به دلیل

۱۵۰ و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. سپس نمونه‌های متراکم با استفاده از اربه‌برقی برشکاری به نمونه‌های نیم‌دایره با ارتفاع ۷۵ میلی‌متر، ضخامت ۳۰ میلی‌متر و ترک مصنوعی به عمق ۲۰ میلی‌متر تهیه شدند. در پژوهش حاضر به منظور سنجش رفتار مخلوط آسفالتی در دمای پایین، آزمایش SCB در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد و با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. شکل ۲ نمایی از آزمایش SCB را نشان می‌دهد.

می‌کند که از کاهش تنش‌های حرارتی جلوگیری می‌کند و به محض اینکه تنش‌های حرارتی ناشی از انقباض از حد استحکام کششی مخلوط آسفالتی فراتر رفت، ترک خوردگی ایجاد می‌گردد (Ashani et al., 2022; Ren & Hao, 2022).

در این تحقیق برای بررسی عملکرد مخلوط در دمای پایین از آزمایش SCB طبق استاندارد AASHTO TP105 استفاده شد. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر



شکل ۲. آزمایش خمش نیم‌دایره

توانایی بالاتر مخلوط‌های آسفالتی برای مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین است (Woszuk et al., 2019) و می‌توان آن را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد: رابطه ۱ مربوط به محاسبه انرژی شکست در آزمایش SCB است و از طریق تقسیم کار شکست (مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی) به سطح مقطع شکست (حاصل ضرب ضخامت نمونه در طول شکست) محاسبه می‌شود.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}}$$

که در آن G_f انرژی شکست (ژول بر مترمربع)، W_f کار شکست (ژول) و A_{lig} سطح مقطع شکست (مترمربع) است.

بر اساس تحقیقات موجود، انرژی شکست همبستگی قوی با عملکرد دمای پایین مخلوط‌های بازیافتی دارد و این شاخص برای ارزیابی عملکرد در دمای پایین مخلوط‌های بازیافتی استفاده گردید. انرژی شکست به کار انجام شده در واحد سطح انتشار ترک، به ویژه کار خارجی جذب شده در واحد سطح در هنگام شکست اشاره دارد و در محدوده شاخص‌های مکانیکی قرار می‌گیرد. به طور کلی، انرژی شکست بزرگ‌تر نشان‌دهنده

(۱)

۴-۱- آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم (ITF)

مدت زمان اعمال بار ۰/۲ ثانیه و مدت زمان استراحت در هر سیکل برابر ۰/۸ ثانیه انجام گرفت. با توجه به اینکه در مطالعات مختلف، سطوح تنش از ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلو پاسکال متغیر می‌باشد، حد وسط که بتواند بیانگر ترافیک سنگین باشد، مدنظر قرار گرفت.

UTM یک سیستم تست الکتروهایدرولیک است که به یک محفظه محیطی برای کنترل دما در طول آزمایش مجهز است. سطح و نرخ بار مورد نیاز توسط کامپیوتر کنترل می‌شود. مدل‌های دیفرانسیل متغیر خطی (LVDTs) تغییر شکل نمونه‌ها را کنترل می‌کنند. بارهای مکرر با استفاده از دو نوار بارگذاری در سطح مقطع عمودی به نمونه‌ها اعمال می‌شود. شرط پایان آزمایش تا گسیختگی کامل نمونه است و عمر خستگی متناظر با تعداد سیکل تا شکست نمونه است. شکل ۳ آزمایش ITF را نشان می‌دهد.

ترک‌خوردگی ناشی از خستگی یکی از خرابی‌های مهم روسازی آسفالتی است که در اثر آسیب انباشته تحت بارهای مکرر ایجاد می‌شود (Fakhri et al., 2013). هنگامی که بار چرخ از یک آستانه خاص فراتر می‌رود، تنش ایجادشده در روسازی از مقاومت ساختاری آن فراتر می‌رود و منجر به ایجاد ترک و آسیب شکست ناشی از خستگی می‌شود (Jin et al., 2024). آزمایش ITF در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بیانگر خصوصیات عملکردی مخلوط در دمای میانی است که بر اساس استاندارد EN 12697-24 انجام می‌شود. مطابق استاندارد، نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای شکل به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰۰ و ۶۵ میلی‌متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم گردیدند. سپس به مدت ۳ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و آماده انجام آزمایش شدند.

آزمایش ITF در پژوهش حاضر با استفاده از دستگاه UTM با تنش ثابت ۴۰۰ کیلوپاسکال، شکل بارگذاری نیم سینوسی،



شکل ۳. آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

۴-۲- آزمایش ویلترک هامبورگ (HWT)

پلاستیک تحت تأثیرات همزمان بارگذاری مکرر ترافیک و دماهای بالا است (Pan et al., 2023).

شیارشده‌گی به دلیل افزایش حجم ترافیک، بارهای محوری و اضافه بارها به یک مشکل عمده در فرسودگی اولیه روسازی‌های آسفالتی تبدیل شده‌اند. این تجمع تغییر شکل

کرد و بر اساس تحقیقات انجام شده توسط لاتمن و همکاران است و به عنوان آزمایش اولیه آسیب رطوبت، به خوبی شناخته شده است (Alfalsh et al., 2023). این آزمایش بر روی نمونه‌های متراکم شده با درصد هوای 7 ± 1 انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه‌ها برای هر نوع مخلوط ۶ عدد است. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شوند که ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد زیر شرایط خلا قرار می‌گیرند. نمونه‌های خلا و اشباع شده در فریزر در دمای 3 ± 18 درجه سانتی‌گراد برای ۱۶ ساعت قرار گرفته و سپس در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت عمل‌آوری شده و سپس با قرارگیری به مدت ۲ ساعت درون حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت کششی نمونه‌های خشک نیز پس از ۲ ساعت قرارگرفتن در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند. هر دو گروه نمونه‌ها تحت بارگذاری ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای گسیختگی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۴ نمایی از آزمایش لاتمن اصلاح شده را نشان می‌دهد.

آزمایش شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی توسط دستگاه ویلترک هامبورگ براساس روش استاندارد AASHTO T324 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام پذیرفت. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت بر روی سطح نمونه به صورت رفت و برگشتی حرکت می‌کند و نمونه در شرایط خشک یا غرقاب مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نمونه‌های استوانه‌ای مورد استفاده در آزمایش به روش تراکم چرخشی با قطر و ارتفاع، به ترتیب ۱۵۰ و ۶۰ میلی‌متر و فضای خالی ۷ درصد مطابق استاندارد ASTM D6925 ساخته و متراکم شدند. برای انجام آزمایش، نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک، در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد با بار چرخ ۷۰۰ نیوتن و سرعت حرکت رفت و برگشتی ۵۰ عبور در دقیقه، تحت ۱۰۰۰۰ سیکل رفت و برگشت چرخ بارگذاری دستگاه شیارشدگی قرار گرفتند.

۴-۳-آزمایش حساسیت رطوبتی

نفوذ رطوبت به روسازی‌های انعطاف‌پذیر باعث تضعیف پیوند قیر-سنگدانه‌ها می‌شود و منجر به جداشدن مصالح از هم می‌شود (Alfalsh et al., 2023). روش AASHTO T283 که در سال ۱۹۷۸ توسعه یافت، کاربرد گسترده‌ای پیدا



شکل ۴. آزمایش لاتمن اصلاح شده

مقاومت کششی نمونه‌های مورد آزمایش از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

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

که در آن ITS مقاومت کششی برحسب کیلوپاسکال، P حداکثر نیرو برحسب نیوتن، t ضخامت نمونه و D قطر نمونه برحسب میلی‌متر است. مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت مطابق رابطه ۳ با نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع‌شده به نمونه‌های خشک بیان می‌شود.

$$TSR = \frac{ITS_{cond}}{ITS_{uncond}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن TSR نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع‌شده به نمونه‌های خشک، ITS_{uncond} میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک و ITS_{cond} میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها تحت شرایط اشباع برحسب کیلو پاسکال است.

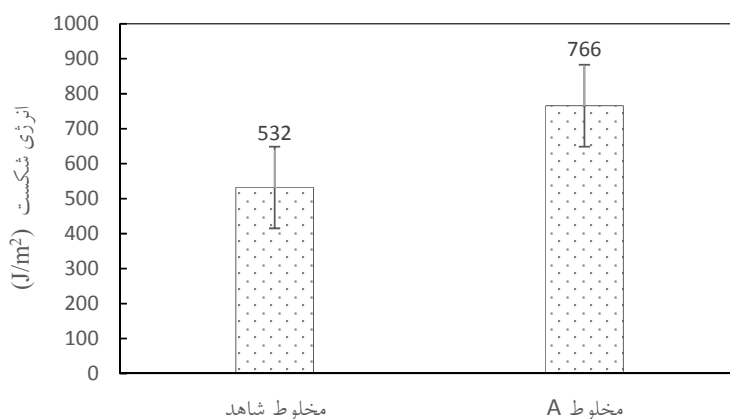
نتایج و تحلیل‌ها

در تحلیل نتایج این بخش ذکر این نکته ضروری می‌باشد که با توجه به این که نتایج حاصل از تکرار آزمایش‌ها مشابه و نزدیک به یکدیگر می‌باشد و نتایج از دقت بالایی برخوردار است، تحلیل‌های آماری ارائه نشده است.

(et al., 2021). انرژی شکست یک ویژگی مهم ماده است که انرژی مورد نیاز برای تشکیل یک سطح شکستگی جدید در نمونه را منعکس می‌کند. با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی، پارامتر انرژی شکست محاسبه گردید. مقادیر انرژی شکست در شکل ۵ نشان می‌دهد که انرژی شکست برای مخلوط حاوی فیلر RAP حدود ۴۴ درصد نسبت به مخلوط شاهد افزایش یافته‌است. افزایش انرژی شکست در دماهای پایین درجه عملکردی (PG) نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر ترک حرارتی است.

آزمایش خمش نیم‌دایره

آزمایش SCB مطابق استاندارد AASHTO TP105 انجام گرفت. یکی از مهم‌ترین پارامترها در مکانیک شکست برای ارزیابی پتانسیل ترک، بر انرژی شکست تکیه دارد (Radeef)



شکل ۵. انرژی شکست نمونه‌ها

موضوع می‌تواند ناشی از وجود ذرات فیلر RAP باشد که در نتیجه علاوه بر افزایش انعطاف‌پذیری، تاب‌آوری مخلوط افزایش یافته و به طبع آن توانایی جذب انرژی بیشتر توسط

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل انرژی شکست به وضوح می‌توان دریافت که افزودن فیلر RAP باعث بهبود عملکرد روسازی آسفالتی در شرایط دمای پایین ترافیکی می‌شود که این

آسفالتی است (Al-Khateeb & Basheer, 2009; Kahveci & Özen, 2024).

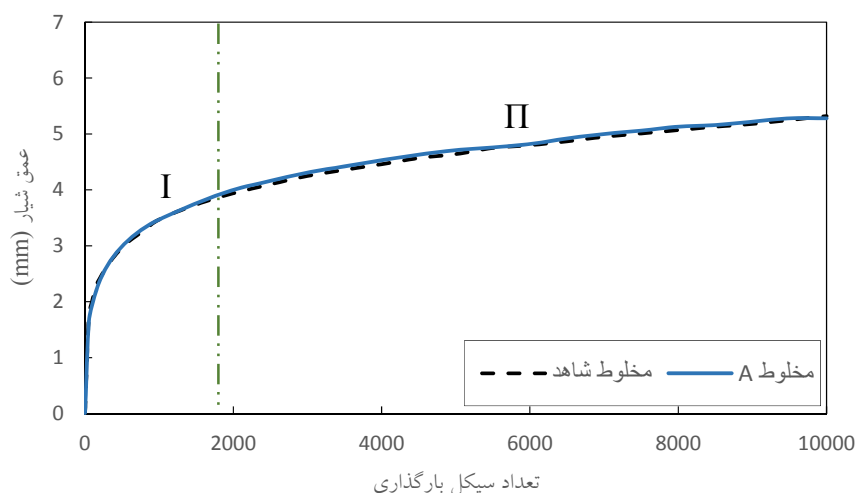
شکل ۶ منحنی عمق شیار در برابر تعداد سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج، اعداد عمق شیار به همراه شیب منحنی در ناحیه خزشی (قسمت خطی نمودار) در شکل ۷ ارائه شده‌است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش شیار شدگی چرخ هامبورگ می‌توان دریافت که هر دو نمونه در طول ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری فقط وارد مرحله اولیه و ثانویه شده‌اند.

تغییرشکل‌های اولیه برای هر دو نمونه ثابت بوده و اختلاف چندانی ندارند. شیب نمودار در مرحله خزشی برای مخلوط شاهد و مخلوط حاوی فیلر RAP تقریباً یکسان و برابر عدد ۰/۱۶ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری است. در نتیجه می‌توان اذعان کرد که افزودن فیلر RAP تاثیر محسوسی در عملکرد مخلوط آسفالتی در دماهای بالا ندارد. به گونه‌ای که عمق شیار برای مخلوط شاهد و مخلوط حاوی فیلر RAP تقریباً یکسان به دست آمد و می‌توان نتیجه گرفت جایگزین کردن فیلر RAP بر عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای بالا تاثیر چندانی ندارد و مانند نمونه شاهد عمل می‌کند. وجود ذرات فیلر RAP مخلوط را نرم تر و از خاصیت سفتی آن می‌کاهد.

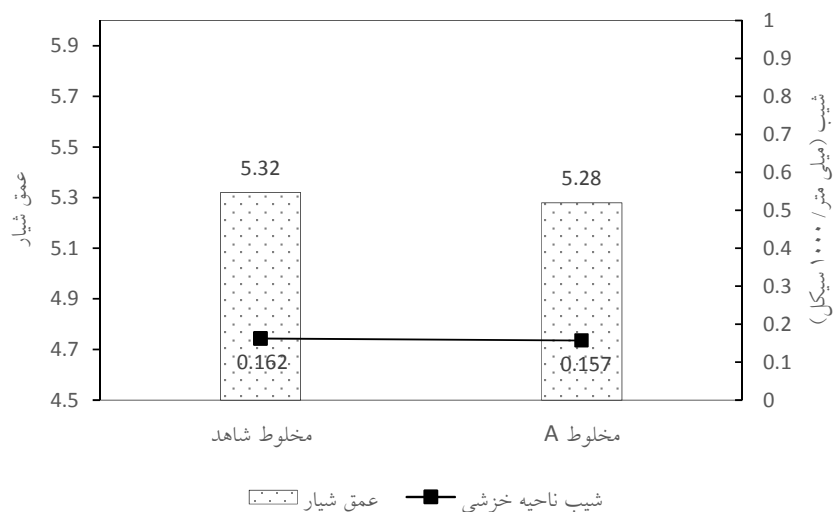
نمونه قبل از شکست افزایش می‌یابد. همچنین شیب خطی ناحیه صعودی نمودار نیرو-جابجایی که بیانگر سفتی نمونه است، در مخلوط A کمتر از مخلوط شاهد است که نشان دهنده سفتی کم‌تر و تاثیر فیلر RAP بر افزایش انعطاف‌پذیری نمونه و بهبود رفتار الاستیک مخلوط آسفالتی است.

شیارشدگی ویلترک هامبورگ

مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش HWT ارزیابی شد. آزمایش HWT با پیروی از استاندارد AASHTO T324 انجام شد. عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در این آزمایش معمولاً با استفاده از منحنی تغییر شکل-تعداد سیکل بارگذاری، توصیف می‌گردد و به سه مرحله تقسیم می‌شود (Al-Khateeb & Basheer, 2009). مرحله اولیه یا پس‌تراکم (Post-compaction) مرحله اولیه است و معمولاً در ۱۰۰۰ عبور چرخ اول است. این مرحله توسط مرحله ثانویه دنبال می‌شود که منطقه خزشی مخلوط آسفالت را شامل می‌شود. تغییرشکلی که در این مرحله انباشته می‌شود غیرقابل برگشت (تغییرشکل خزشی) است و در نهایت، مرحله سوم (جریان) مربوط به عملکرد حساسیت به رطوبت مخلوط



شکل ۶. منحنی عمق شیار در برابر تعداد سیکل بارگذاری

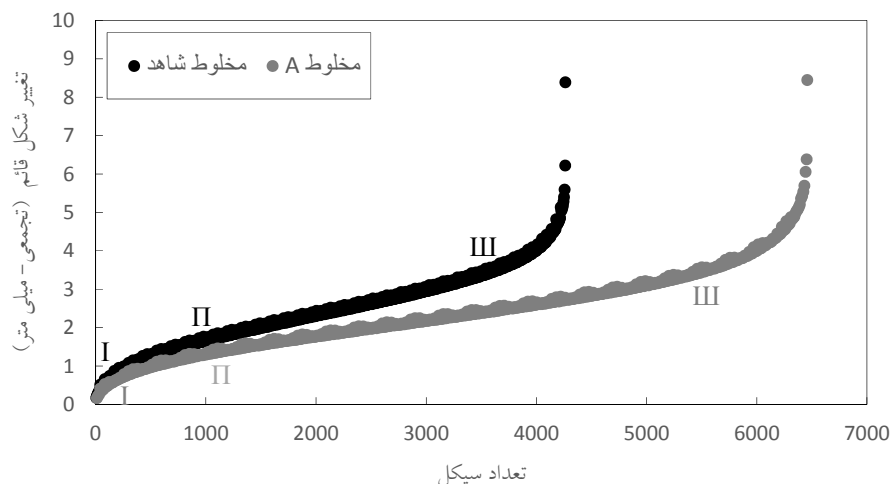


شکل ۷. مقادیر شیب خزشی در برابر عمق شیار

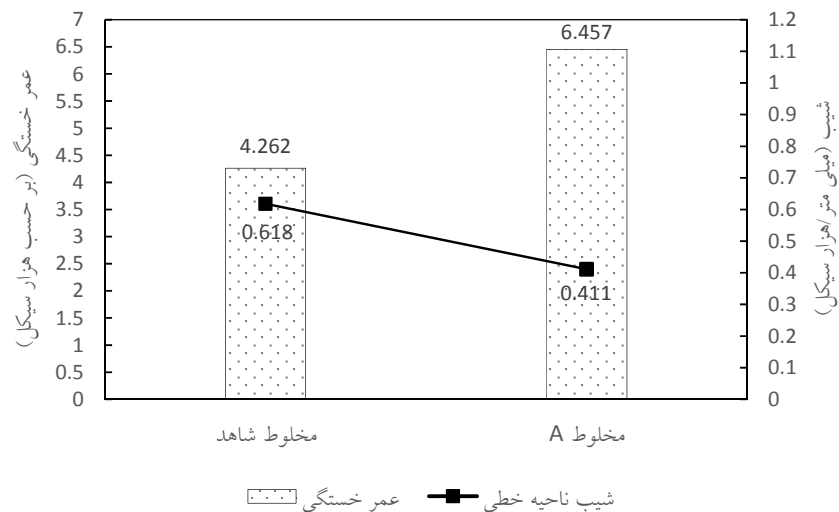
خستگی کشر غیرمستقیم

این آزمایش با استفاده از دستورالعمل ارائه شده در EN 12697-24 انجام گردید. آزمایش ITF تا زمان شکستن کامل نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفت. شکل ۸ تغییر شکل انباشته شده در مقابل سیکل بارگذاری را در سطح تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. مکانیسم خستگی از سه مرحله تشکیل شده است (Yilmaz & Erdoğan Yamaç, 2017). در مرحله اولیه، مقدار زیادی تغییر شکل ناشی از تراکم و جابجایی سنگدانه‌ها در مرکز نمونه رخ می‌دهد که به دنبال آن تغییر شکل محوری کاهش می‌یابد. در مرحله ثانویه، شیب تغییرات تغییر شکل ثابت شده و تغییر شکل به صورت خطی افزایش می‌یابد. در این مرحله میکروترک‌ها شروع به شکل‌گیری می‌کنند. در ناحیه سوم، شیب نمودار افزایش می‌یابد و میکروترک‌هایی که در مرحله دوم ایجاد شده‌اند، پیشرفت کرده و با هم ترکیب می‌شوند و منجر به ترک‌های بزرگ‌تر یا ماکروترک‌ها می‌شوند. بنابراین، فرآیند تخریب شامل دو مرحله مختلف است. در فاز اول، ماده شروع و انتشار یک شبکه ریزترک را در پوشش قیری سنگدانه‌ها تجربه می‌کند، در حالی که در فاز دوم، ترک‌های ماکرو با ادغام ریزترک‌ها ظاهر می‌شوند و در داخل مخلوط آسفالت منتشر می‌شوند تا اینکه باعث شکست کامل آن شوند (Corradini & Cerni, 2020). افزایش سریع تغییر شکل برای هر دو مخلوط وجود دارد که نشان‌دهنده فشردگی فضای خالی هوا در طول

بارگذاری است (مرحله ۱). پس از آن تغییر شکل به صورت خطی (مرحله ۲) برای بیشتر نمودار افزایش یافت که به انتخاب روش تنش ثابت نسبت داده می‌شود. بر اساس معادله خط، هر سه فاز بر روی منحنی نیرو-جابجایی تعیین گردید. با توجه به شکل ۸، تغییر شکل‌های مخلوط A در هر سه فاز کمتر از مخلوط شاهد می‌باشد. همچنین شیب منحنی در فاز دوم (ناحیه خطی) برای مخلوط حاوی فیلر RAP کمتر از مخلوط شاهد است و می‌توان بیان نمود که سرعت تشکیل میکروترک‌ها در مخلوط حاوی فیلر RAP کمتر از مخلوط شاهد است. در نتیجه مخلوط قادر است تعداد تکرار بار بیشتری را قبل از ورود به ناحیه سوم (شروع تشکیل ماکروترک‌های منجر به گسیختگی نمونه) تحمل کند که نشان‌دهنده مقاومت خستگی بالاتر مخلوط حاوی فیلر RAP است. تعداد سیکل قابل تحمل در فاز دوم (انتشار میکروترک‌ها) برای مخلوط A برابر ۳۷۲۷ و برای مخلوط شاهد این مقدار برابر ۲۳۲۷ به دست می‌آید که نشان‌دهنده کاهش ۶۰ درصدی سرعت انتشار میکروترک‌ها نسبت به مخلوط شاهد می‌باشد. همچنین اثری شکست بالاتر مخلوط A که از آزمایش SCB تعیین گردید، می‌تواند این موضوع را تایید نماید. زیرا هرچه مقادیر انرژی شکست بالاتر باشد، عمر خستگی مخلوط HMA بیشتر می‌شود (Shu et al., 2008).



شکل ۸. نمودار تغییر شکل تجمعی در برابر تعداد تکرار بار



شکل ۹. مقادیر عمر خستگی در برابر شیب ناحیه خطی نمودار تغییر شکل-تعداد تکرار بار

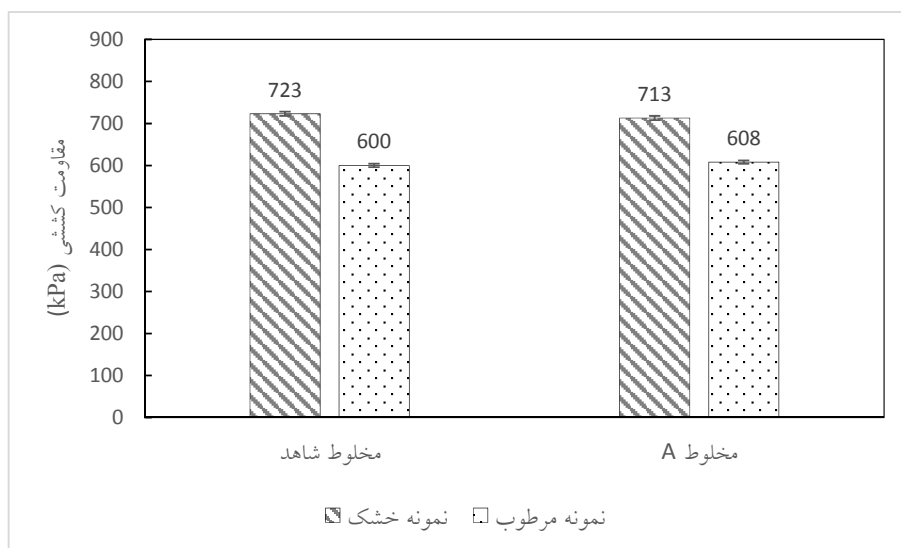
آزمایش حساسیت رطوبتی

شکل ۱۰ نتایج استحکام کششی نمونه‌ها در هر دو حالت خشک و اشباع نشان می‌دهد که در آن مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک برای مخلوط حاوی فیلر RAP کم‌تر از مخلوط شاهد است که می‌تواند به دلیل اثر نرم‌کنندگی قیر موجود در فیلر RAP باشد. در مقابل مقاومت کششی نمونه‌های اشباع‌شده برای مخلوط حاوی فیلر RAP مقدار بالاتری است که نشان می‌دهد فیلر RAP منجر به حساسیت کمتری نسبت به رطوبت می‌شود و باعث مقاومت در برابر نفوذ آب به ساختار مخلوط آسفالتی می‌گردد. به دلیل وجود ذرات

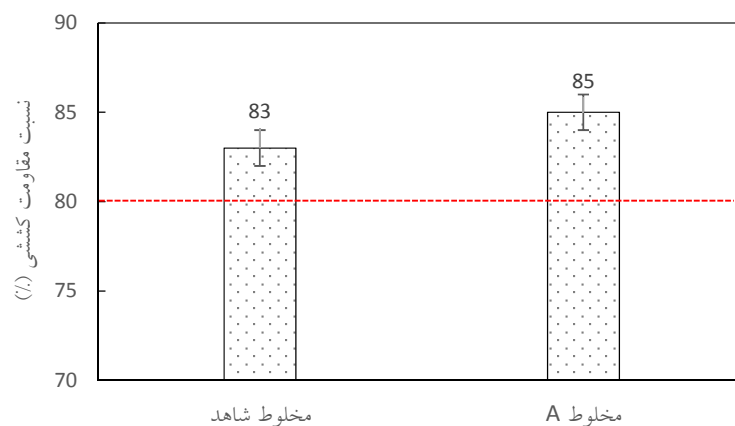
بر اساس EN 12697-24، در آزمون خستگی کشش غیر مستقیم، عمر خستگی به عنوان تعداد کل چرخه‌های بارگذاری که منجر به تقسیم کامل نمونه می‌گردد، تعریف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد عمر خستگی مربوط به مخلوط حاوی فیلر RAP، ۵۱ درصد از مخلوط شاهد بیشتر است. به منظور مقایسه نتایج، اعداد عمر خستگی به همراه شیب ناحیه خطی در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد هرچه شیب ناحیه خطی نمودار تغییر شکل-تعداد سیکل کم‌تر باشد، عمر خستگی مخلوط بالاتر است.

می‌دهد که شاخص TSR برای مخلوط شاهد ۸۳ درصد به دست آمده‌است و این شاخص برای مخلوط حاوی فیلر RAP، ۲ درصد افزایش یافته و به مقدار ۸۵ درصد رسیده‌است. نتایج آزمایش لاتمن نشان می‌دهد که استفاده از فیلر RAP در مخلوط آسفالتی، باعث کاهش حساسیت به رطوبت مخلوط آسفالتی می‌گردد.

قیر در ساختار فیلر RAP، این فیلر می‌تواند به عنوان یک ماده آبریز عمل کرده و در برابر نفوذ آب به داخل مخلوط مقاومت کند و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را حفظ نماید. مطابق با استاندارد AASHTO T283، مقدار نسبت مقاومت کششی (TSR) مخلوط آسفالتی باید حداقل ۸۰ درصد باشد تا در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت مقاومت کند. شکل ۱۱ نشان



شکل ۱۰. مقاومت کششی نمونه‌های خشک و نمونه‌های اشباع شده



شکل ۱۱. نسبت مقاومت کششی مخلوط‌ها

۵- نتیجه گیری

نتایج آزمایش SCB نشان داد برای مخلوط A، پارامتر انرژی شکست ۴۴ درصد نسبت به مخلوط شاهد افزایش یافت که نشان می‌دهد فیلر RAP باعث بهبود عملکرد مخلوط در برابر ترک حرارتی می‌گردد.

در این تحقیق فیلر RAP به طور کامل با فیلر کنترل (سیلیسی) جایگزین گردید و درصد قیر بهینه هر کدام تعیین شد. در ادامه خواص مکانیکی مخلوط شاهد و مخلوط حاوی فیلر RAP (مخلوط A) مورد ارزیابی قرار گرفت. موارد اشاره شده در ادامه به طور خلاصه نتایج را نشان می‌دهد.

-نتایج آزمایش HWT نشان داد که جایگزینی فیلر RAP تاثیر محسوسی در افزایش مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی نسبت به مخلوط شاهد ندارد. به گونه‌ای که عمق شیار برای مخلوط A و مخلوط شاهد به ترتیب ۵/۲۸ و ۵/۳۲ میلی‌متر به دست آمد.

در نهایت می‌توان اذعان داشت که جایگزینی کامل فیلر RAP با فیلر معدنی می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالتی را در برابر ترک‌های خستگی، حرارتی و همچنین حساسیت رطوبتی بهبود ببخشد و می‌تواند به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای فیلهای معدنی در نظر گرفته شود.

-با توجه به نتایج آزمایش ITF، در مخلوط A عمر خستگی ۵۰ درصد افزایش یافت و سرعت انتشار میکروتکرک‌ها ۶۰ درصد نسبت به مخلوط شاهد کاهش یافت که نشان می‌دهد فیلر RAP می‌تواند عمر مخلوط در برابر ترک‌های خستگی را افزایش دهد و در نتیجه نمونه تعداد تکرار بار بیشتری را قبل از ایجاد ماکروتکرک‌ها و شکست نمونه تحمل می‌کند.

-شاخص TSR برای مخلوط A برابر ۸۵ درصد و برای مخلوط شاهد ۸۲ درصد به دست آمد و می‌توان اذعان داشت که فیلر RAP می‌تواند مانند یک ماده آگریز عمل کند و حساسیت رطوبتی مخلوط را کاهش دهد.

۶-مراجع

- Bérubé, M.-A., Lamothe, S., Bilodeau, K., & Carter, A. (2023). Laboratory study of the effects of the mixer type and mixing time on the volumetric properties and performance of a HMA with 30 percent reclaimed asphalt pavement. *Materials*, 16(3), 1300 .
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2018). Application of waste materials as fillers in bituminous mixes, *Waste Management*, 78, 417–425 .
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2018). Performance of asphalt mix with glass and glass-lime composite fillers. In *Advances in Materials and Pavement Prediction* (pp. 387–390). CRC Press .
- Choudhary, J., Kumar, B & ,Gupta, A. (2020a). Performance evaluation of asphalt concrete mixes having copper industry waste as filler. *Transportation Research Procedia*, 48, 3656–3667 .
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020b). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271 .
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2021). Utilization of waste glass powder and glass composite fillers in asphalt pavements. *Advances in Civil Engineering*, 3235223 (1).
- Al-Khateeb, G., & Basheer, I. (2009). A three-stage rutting model utilising rutting performance data from the Hamburg Wheel-Tracking Device (WTD). *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 18(3), 12–25 .
- Alfalsh, A., Ali, A., & Mehta, Y. (2023). Estimating tensile strength ratio of asphalt mixtures using Surface Free Energy (SFE) and Fourier Transform Infrared Attenuated Total Reflectance (FTIR-ATR). *Construction and Building Materials*, 409, 133900 .
- Arabani ,M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M. (2017). Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 713–729 .
- Ashani, S. S., Varamini, S., Elwardany, M. D., & Tighe, S. (2022). Investigation of low-temperature cracking resistance of asphalt mixtures by conducting Disc-Shaped Compact Tension (DC (T)) and Semi-Circular Bend (SCB) tests. *Construction and Building Materials*, 359, 129275 .
- Belayali, F., Maherzi, W., Benzerzour, M., & Abriak, N.-E. (20۲۳). Influence of the physical and chemical characteristics of sediment fillers on the properties of mastic asphalt. *Powder Technology*, 421, 118393 .

- of recycled asphalt mixtures. *Frontiers in Materials*, 8, 842809 .
- McDaniel, R. S., & Anderson, R. M. (2001). Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual .
- Mukhtar, N., Hasan, M. R. M., Ghazali, M. F. H. M., Zin, Z. M., Shariff, K. A., & Sani, A. (2021). Influence of concentration and packing of filler particles on the stiffening effect and shearing behaviour of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 295, 123660 .
- Muñoz Perez, S. P., & Onofre Maicelo, P. A. A. (2021). Use of recycled asphalt as an aggregate for asphalt mixtures: literary review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3), 146 .
- Pan, Y., Guo, H., Guan ,W., & Zhao, Y. (2023). A laboratory evaluation of factors affecting rutting resistance of asphalt mixtures using wheel tracking test. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02148 .
- Pradhan, S. K., Das, U., & Patra, A. R. (2023). Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in HMA mixtures for flexible pavement construction. *Materials Today: Proceedings* .
- Radeef, H., Hassan, N. A., Abidin, A. Z., Mahmud, M., Satar, M. M., Warid, M. M., & Al Saffar, Z. (2021). Determining fracture energy in asphalt mixture, A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Raju, S., & Katla, B. (2024). Utilization of higher percentage of reclaimed asphalt pavement material in bituminous mixtures. In *Green Materials in Civil Engineering Elsevier*. 165–180.
- Ren, Y.-X., & Hao, P.-W. (2022). Low-temperature performance of asphalt mixtures modified by microencapsulated phase change materials with various graphene contents. *Coatings*, 12(2), 287 .
- Roja, K. L., Masad, E., & Mogawer, W. (2021). Performance and blending evaluation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Road*
- Corradini, A., & Cerni, G. (2020). A new analytical approach for stiffness loss modelling of asphalt mixtures under cyclic indirect tensile loadings. *International Journal of Fatigue*, 135, 105535 .
- De Pascale, B., Tarsi, G., Tataranni, P & ., Sangiorgi, C. (2024). Potential application of waste bivalve shells as recycled filler in porous asphalt concrete through rheo-mechanical analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 209, 107830 .
- Development, M. o. R. a. U. (2011). *Iran highway asphalt paving code (code- 234)*. (Code-234, Issue. M. o. R. a. U. Development .
- Fakhri, M., Ghanizadeh, A. R., & Omrani, H. (2013). Comparison of fatigue resistance of HMA and WMA mixtures modified by SBS. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 168–177 .
- Han, S., Cheng, X., Liu, Y., & Zhang, Y. (2019). Laboratory performance of hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement (RAP) and fine reclaimed asphalt pavement (FRAP) content. *Materials*, 12(16), 2536 .
- Institute, A. (2015). Recycled Asphalt Materials in the Mix Design Process. In t. Edition (Ed.), *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*, Asphalt Institute, 35–155.
- Jin, T., Yuan, J., Peng, X., Li, J., & Yang, R. (2024). A fatigue damage model of asphalt mixture considering tensile and compressive modulus decay. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03133 .
- Kahveci, T. E., & Özen, H. (2024). Utilisation of Waste Sludge from Drinking Water Treatment as a Filler Material in Hot Mix Asphalt. *Materials*, 17(7), 1528 .
- Li, M., Han, Z., Cheng, H ,.Yang, R., Yuan, J., & Jin, T. (2025). Low-temperature performance improvement strategies for high RAP content recycled asphalt mixtures: Focus on RAP gradation variability and mixing process. *Fuel*, 387, 134362 .
- Ma, X., Wang, J., & Xu, Y. (2022). Investigation on the effects of RAP proportions on the pavement performance

- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. *Materials*, 13(18), 4052 .
- West, R., Kvasnak, A., Tran, N., Powell, B., & Turner, P. (2009). Testing of moderate and high reclaimed asphalt pavement content mixes: laboratory and accelerated field performance testing at the national center for asphalt technology test track. *Transportation Research Record*, 2126(1), 100–108 .
- Wozuk, A., Bandura, L., & Franus, W. (2019). Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 23, 493-502.
- Xing, C., Li, M., Liu, L., Lu, R., Liu, N., Wu, W., & Yuan, D. (2023). A comprehensive review on the blending condition between virgin and RAP asphalt binders in hot recycled asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136515 .
- Yilmaz, M., & Erdoğan Yamaç, Ö. (2017). Evaluation of Gilsonite and Styrene-Butadiene-Styrene composite usage in bitumen modification on the mechanical properties of hot mix asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 04017089 .
- Zalghout, A., Castro, S., Karam, J., & Kaloush, K. (2022). Laboratory and field evaluation of plant produced asphalt mixtures containing RAP in hot climate: A case study from Phoenix, Arizona. *Construction and Building Materials*, 351, 128322 .
- Materials and Pavement Design*, 22(11), 2441–2457 .
- Rondón-Quintana, H. A., Forero-Rubiano, K. T., Valderrama-Agudelo, Y. S., Bastidas-Martínez, J. G & ,Zafra-Mejía, C. A. (2025). Zinc Oxide as a Filler in a Hot-Mix Asphalt: Impact on Mechanical Properties. *Infrastructures*, 10(5), 110 .
- Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390–397.
- Shamsaei, M., Khafajeh, R., Ghasemzadeh Tehrani, H., & Aghayan, I. (2020). Experimental evaluation of ceramic waste as filler in hot mix asphalt. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 535–543 .
- Shu, X., Huang, B., & Vukosavljevic, D. (2008). Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1323–1330 .
- Tabaković, A., Gibney, A., McNally, C., & Gilchrist, M .D. (2010). Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(6), 643–650 .
- Taherkhani, H., & Bayat, R. (2022). Investigating the properties of asphalt concrete containing recycled brick powder as filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(8), 3583–3593 .

The Effect of Using Filler Obtained from Reclaimed Asphalt Pavement Material on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

Danyal Shirvani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Alireza Sarkar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: sarkar@srbiau.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

Reclaimed asphalt pavement (RAP), due to its potential for reuse in asphalt mixtures, reduces economic costs and limits environmental impacts. Despite numerous studies on the effects of different percentages of RAP on the performance of hot mix asphalt (HMA), there is a lack of research investigating the role of RAP as a filler in asphalt mixtures. Therefore, to enhance RAP recycling in asphalt mixtures, this study examines a new approach by using RAP as a filler in HMA. In the first stage, the RAP filler was used as a complete replacement for the control filler, and the optimum binder content was determined according to the Marshall standard. Then, the mechanical properties of the mixture containing RAP filler were evaluated using the semi-circular bending (SCB) test, indirect tensile fatigue (ITF) test, Hamburg wheel tracking (HWT) test, and moisture sensitivity, and the results were compared with those of the control mixture. The findings showed that the use of RAP filler led to significant improvements in the mechanical properties and durability of the asphalt mixture. Specifically, the fracture energy and fatigue life parameters increased by 44% and 50%, respectively, and the micro-crack propagation rate decreased by 60%. Additionally, the TSR index increased by about 2%, indicating improved moisture damage resistance. According to the HWT test results, adding RAP filler did not have a significant effect on the rutting performance of the asphalt mixture. In general, it can be concluded that RAP filler improves the mechanical properties and moisture sensitivity of HMA. Therefore, the use of RAP filler in HMA can be recommended.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, RAP Filler, Fracture Mechanics, Fatigue, Thermal Cracking