



ارزیابی عملکرد آسفالت گرم ساخته شده با خرده آسفالت و مسلح شده با الیاف پارافایبر

حسن زیاری^۱، حسن دیواندری^{۲*}، مهدی اروئی^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

بازیافت آسفالت

عملکرد آسفالت گرم

خرده آسفالت

افزودنی پارافایبر

کائوواکس

خلاصه: بازیافت آسفالت یکی از راهکارهای افزایش کارآمدی بودجه و سرمایه موجود در زمینه نگهداری و بهسازی شبکه راه‌ها بوده و همچنین موجب حفظ منابع طبیعی و صرفه جویی در هزینه‌ها می‌شود. اما در فرآیند تولید آسفالت داغ با استفاده از مصالح خرده آسفالت، درجه حرارت بالا موجب سخت‌تر شدن قیر و نیز تولید گازهای سمی شده که منجر به آلودگی زیست‌محیطی فراوانی می‌شود. با استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم، ضمن کاهش دما، علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، شرایط بهتری برای کارگران در محیط کار به لحاظ درجه حرارت پایین‌تر و انتشار مواد سمی کمتر فراهم می‌گردد و نیز سبب کاهش میزان پیرشدگی قیر و کاهش سخت‌شدگی ناشی از اکسیداسیون قیر می‌شود. این پژوهش استفاده از دو تکنولوژی جهت کاهش هزینه و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از تولید آسفالت و همچنین بهبود عملکرد آسفالت را ارزیابی نمود که یکی استفاده از آسفالت گرم با افزودنی کائوواکس و دیگری استفاده از خرده آسفالت در طرح مخلوط آسفالتی است. از الیاف پارافایبر نیز با مقادیر مختلف جهت بهبود خواص عملکردی آسفالت استفاده گردید. جهت مقایسه و بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و خستگی انجام گردید. طبق نتایج به دست آمده، استفاده از خرده آسفالت موجب افزایش مدول برجهندگی و بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی مخلوط می‌شود، که دلیل آن را می‌توان افزایش سختی مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن خرده آسفالت دانست. با توجه به نتایج آزمایش خستگی، مشخص گردید که با اضافه کردن خرده آسفالت، عمر خستگی مخلوط، کاهش چشم‌گیری می‌یابد؛ اما با اضافه کردن الیاف پارافایبر، عمر خستگی بهبود قابل توجهی می‌یابد که به نظر می‌رسد مقاومت کششی و انعطاف پذیری بالای الیاف را می‌توان دلیل بهبود عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی دانست. بدین ترتیب این امکان فراهم می‌شود که ضمن کاهش قابل ملاحظه هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی، آسفالتی با عملکرد مناسب تولید نمود.

۱- مقدمه و تاریخچه پژوهش

۱-۱- مقدمه

برای تولید آسفالت داغ^۱ معمولی، دمای بسیار بالایی مورد نیاز است که از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی به دست آمده و آلودگی قابل توجهی منتشر می‌شود. طبق پژوهش‌های انجام شده، به ازای هر تن آسفالت داغ، در حدود ۳۰۰ مگاژول انرژی مصرف می‌شود و ۲۸/۸ کیلوگرم کربن دی‌اکسید به جو آزاد می‌شود [۱-۳]. لذا

1 Hot Mix Asphalt (HMA)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: divandari@iauns.ac.ir

پژوهشگران حوزه تولید مخلوط‌های آسفالتی، تحقیقات بسیاری جهت برطرف کردن این مشکل انجام دادند. یکی از راهکارهای پیشنهادی، استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم است که به موجب این تکنولوژی، دمای تولید آسفالت کاهش می‌یابد و معضلات ناشی از دمای بالای تولید آسفالت نیز تا حد زیادی برطرف می‌گردد. فناوری آسفالت گرم ابتدا در اواخر ۱۹۹۰ در اروپا مطرح شد و با توجه به اهمیت سیستم روسازی پایدار و مزایای برجسته محیط زیستی و اقتصادی و فواید ناشی از کاهش مصرف انرژی، استقبال پژوهشگران صنعت روسازی آسفالتی را به دنبال داشت و به‌طور

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



کرده است و همچنین به ازای ساخت آسفالت داغ، آلودگی‌های زیست محیطی زیادی را تولید کرده است. با توجه به نگرانی‌های زیست محیطی و اهمیت حفظ منابع طبیعی و کاهش مصرف مواد اولیه همچون قیر و مصالح سنگی و از طرفی دیگر تلاش جهت کاهش میزان انتشار آلودگی در فرایند تولید آسفالت، امروزه ضرورت بازیافت آسفالت بیش از پیش احساس می‌شود.

۱-۳- اهمیت موضوع

با توجه به مزایای تولید آسفالت گرم که موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود و انتشار آلودگی کمتری را به دنبال دارد و همچنین مزایای بازیافت آسفالت که کاهش مصرف منابع اولیه را در پی دارد، این پژوهش به دنبال بررسی عملکرد مخلوط آسفالت گرم حاوی خرده آسفالت^۲ (تغییرات مدول برجهندگی، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی و عمر خستگی) و همچنین راهکاری جهت بهبود بخشیدن به نقاط ضعف این نوع مخلوط می‌باشد.

۱-۴- هدف پژوهش

استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم در کنار استفاده از مصالح خرده آسفالت، می‌تواند تا حد زیادی مشکلات ناشی از تولید و انتشار گازهای مضر و آلودگی‌های زیست محیطی را حل کند. اما در مقابل، چالش‌های جدیدی را از جمله تأثیر افزودنی‌های گرم، سایر افزودنی‌ها، مصالح خرده آسفالتی و اثر کاهش دما بر عملکرد این مخلوط‌های آسفالتی را به وجود می‌آورد. شناخت و درک رفتار مصالح خرده آسفالت در مخلوط‌های بازیافتی یک پیش‌نیاز اساسی جهت ارائه یک طرح اختلاط منطقی برای مخلوط‌های با درصد بالای خرده آسفالت می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است این مهم طی آزمون‌های آزمایشگاهی متعدد، مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور مخلوط‌های گرم با استفاده از مقادیر مختلف خرده آسفالت (۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ وزن مصالح سنگی مخلوط) و مقادیر مختلف افزودنی پارافایبر (۰٪، ۰/۰۶٪، ۰/۱۲٪ و ۰/۱۸٪ وزن مصالح سنگی مخلوط) ساخته شد و مورد آزمون‌های عملکردی قرار گرفت. در آخر، تأثیر هریک از مقادیر افزودنی‌های خرده آسفالت و پارافایبر بر هریک از خصوصیات مدول برجهندگی، مقاومت در برابر

گسترده در نقاط مختلف جهان، مورد استفاده قرار گرفت [۴-۸]. دمای مورد نیاز برای تولید آسفالت گرم، به طور متوسط حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از آسفالت داغ می‌باشد و از این رو انرژی کمتری مصرف می‌شود [۹،۱۰]. لذا موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود و سوخت‌های فسیلی بسیار کمتری در محل تولید آسفالت مصرف می‌شود. برای مثال طبق آزمایش‌های انجام شده، به ازای 27°C کاهش دمای تولید آسفالت، مصرف سوخت ۲۲٪ کمتر می‌شود [۱۱]. علاوه بر این تولید آسفالت‌های گرم در دماهای پایین‌تر، سبب کاهش میزان پیرشدگی^۱ و سخت‌شدگی ناشی از اکسیداسیون قیر می‌شود. همچنین با توجه به اینکه اختلاف دمای بین محیط و مخلوط آسفالتی کمتر است، فاصله بین محل تولید آسفالت تا محل مصرف آن می‌تواند افزایش یابد و لذا در فواصل دورتری از محل پروژه (محل مصرف آسفالت) می‌توان آسفالت مورد نیاز را تولید کرد. علاوه بر موارد گفته شده، این قابلیت را ایجاد می‌کند که در شرایط آب و هوایی سردتر نیز، انجام پروژه ممکن باشد. بنابراین با استفاده از این روش، در فصول سرد سال که اختلاف دمای بین محیط و آسفالت داغ تولید شده زیاد است و در پخش و تراکم آسفالت ممکن است مشکلاتی ایجاد شود، می‌توان با استفاده از فناوری آسفالت گرم، با محدودیت بسیار کمتری به انجام پروژه ادامه داد [۱۲]. یکی دیگر از روش‌هایی که با استفاده از آن، میزان آلودگی زیست‌محیطی ناشی از ساخت روسازی آسفالتی کاهش می‌یابد، بازیافت آسفالت می‌باشد. محققین در حوزه‌های مختلف در تلاش‌اند تا مواد دور ریختنی را بازیافت کرده و به منظور پایداری بیشتر محیط‌زیست، از آن‌ها مجدداً استفاده نمایند [۱۳]. در صنعت آسفالت نیز این موضوع مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از دیگر مزایای بازیافت آسفالت، می‌توان به کاهش مصرف مواد اولیه همچون قیر و مصالح سنگی اشاره نمود. علاوه بر این، مقدار آسفالت پیر شده‌ای که از تخریب روسازی آسفالتی قدیمی به دست می‌آید و دپوی آن باعث افزایش آلودگی‌های زیست محیطی می‌گردد، کاهش می‌یابد [۱۴].

۱-۲- بیان مسأله

در طول سالین متوالی، بشر همواره برای تولید انبوه آسفالت، از منابع اولیه زیادی همچون قیر و مصالح سنگی استفاده بی‌رویه

مخلوط آسفالتی می شود. استفاده از ۵۰٪ خرده آسفالت، موجب کاهش بیشتر از ۳۰٪ هزینه ها می شود. تولید آسفالت گرم نیز موجب حدود ۲۰٪ صرفه جویی انرژی می شود [۱۷].

میگوئل^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی، آسفالت گرم حاوی پودر لاستیک ضایعاتی به دست آمده از تایرها را مورد بررسی قرار دادند و با آسفالت داغ معمولی و آسفالت داغ حاوی پودر لاستیک، مقایسه کردند. در این پژوهش از مایع سورفکتانت^۶ به مقدار ۰/۵ درصد وزن قیر به عنوان افزودنی گرم استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده، آسفالت گرم چگالی کمتری دارد و فضای خالی بیشتری در این مخلوط وجود دارد. استفاده از پودر لاستیک، موجب بهبود مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی می شود، ولی نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم^۷، در مخلوط گرم کاهش می یابد. در مخلوط حاوی پودر لاستیک، مقاومت خزشی فوق العاده بهبود یافته است. ولی کاهش دمای ساخت آسفالت موجب کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک^۸ گردیده است [۱۸].

عامری و همکاران در سال ۱۳۹۱، خواص عملکردی آسفالت بازیافتی به روش گرم را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. در این پژوهش، چهار مخلوط بازیافتی با استفاده از ۱۰۰ درصد خرده آسفالت و یک مخلوط تازه با استفاده از مصالح سنگی خرده آسفالت که از قیر آن جدا شده است، ساخته شد. مخلوط های بازیافتی شامل یک نمونه بازیافتی داغ و سه نمونه بازیافتی گرم، یکی بدون افزودنی، یکی با افزودنی ساسوبیت و دیگری با افزودنی رئوفالت می باشد. همچنین از قیر ۱۰۰-۸۵ به عنوان قیر جدید اضافه شده به مخلوط آسفالتی استفاده گردید. برای تهیه مخلوط آسفالتی تازه از قیر ۷۰-۶۰ استفاده شد. برای ساخت مخلوط های حاوی افزودنی، از ۲ درصد وزنی کل قیر ساسوبیت و ۳ درصد وزنی کل قیر رئوفالت استفاده گردید. با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی گراد در بازیافت، مقاومت نمونه ها به شدت کاهش یافته اما افزودنی های ساسوبیت و رئوفالت، موجب افزایش مقاومت نمونه های گرم شده است، ضمن این که ساسوبیت نسبت به رئوفالت تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت داشته است. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط

تغییر شکل دائمی و عمر خستگی مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفت.

۱-۵- مروری بر پژوهش های پیشین

قیر موجود در آسفالت های قدیمی که از لحاظ فیزیکی و شیمیایی سفت و سخت شده، می تواند مجدداً در یک طرح اختلاط جدید با استفاده از جوان سازها^۱ و یا ترکیب با قیر خیلی نرم، مورد استفاده قرار گیرد. در حدود یک قرن از شناخت بازیافت آسفالت می گذرد و اولین پروژه بازیافت آسفالت مربوط به سال ۱۹۱۵ می شود. البته بازیافت آسفالت تا سال ۱۹۷۰ گسترده نشده بود، تا اینکه به دلیل بحران نفت، قیمت قیر به شدت افزایش پیدا کرد و محققین درصدد بازیافت آسفالت فرسوده و استفاده مجدد از مصالح آن، برآمدند [۱۵]. در سال های اخیر، در پژوهش محققین علاقه زیادی به ترکیب خرده آسفالت در مخلوط گرم مشاهده شده است. منصور فخری و همکاران، در سال ۲۰۱۷ مقاومت خزشی و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت (به مقدار ۰، ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) و الیاف شیشه (به مقدار ۰/۳٪) و ساسوبیت (به مقدار ۱/۵٪) را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده، با اضافه شدن مقدار خرده آسفالت در مخلوط، مقاومت خزشی افزایش می یابد و همچنین میزان حساسیت رطوبتی مخلوط کاهش می یابد [۱۶].

ژو یانگ^۲ و همکاران، در سال ۲۰۱۷ میلادی یک ارزیابی جامع از عملکرد زیست محیطی و مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم ساخته شده از اووترم و پودر لاستیک^۳ را انجام دادند. طبق نتایج به دست آمده، مخلوط گرم حاوی پودر لاستیک و اووترم و همچنین مخلوط داغ حاوی پودر لاستیک، مقاومت کششی بیشتر و همچنین مقاومت بیشتری در برابر رطوبت و خزش در مقایسه با مخلوط داغ معمولی دارند [۱۳].

ویمین سانگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی، عملکرد مخلوط آسفالتی گرم و داغ حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و جوان ساز را مورد بررسی قرار دادند. طبق تحقیقات انجام گرفته، اضافه کردن جوان ساز موجب کاهش مقاومت خزشی و افزایش مقاومت در برابر رطوبت

5 Miguel
6 Liquid Surfactant
7 Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)
8 Plastic Deformation

1 Rejuvenation
2 Xu Yang
3 Crumb Rubber (CR)
4 Weimin Song

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده
Table 1. Characteristics of aggregates used

نتیجه برای مصالح مصرفی	حدود مجاز نشریه ۲۳۴	استاندارد روش آزمایش	آزمایش‌های مصالح سنگی
٪۱۷	حداکثر ٪۳۰	ASTM-C131 ، AASHTO-T96	درصد سایش به روش لس آنجلس
٪۲۲	حداکثر ٪۲۵	ASTM-D4719 ، BS-812	درصد تورق
٪۹۳	حداقل ٪۹۰	ASTM-D5821 ، BS-812	درصد شکستگی در دو وجه
۶/۳٪	حداکثر ٪۸	ASTM-C88 ، AASHTO-T104	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
۲/۶۵۹		ASTM-C127 ، AASHTO-T85	وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه (gr/cm^3)
۲/۶۲۳		ASTM-C128 ، AASHTO-T84	وزن مخصوص مصالح ریزدانه (gr/cm^3)
۱/۳٪	حداکثر ٪۲/۵	ASTM-C127 ، AASHTO-T85	جذب آب مصالح درشت‌دانه
۲/۴٪	حداکثر ٪۲/۸	ASTM-C128 ، AASHTO-T84	جذب آب مصالح ریزدانه
٪۷۴	حداقل ٪۵۰	ASTM D2419	ارزش ماسه‌ای

گرم با افزودنی، از مخلوط بازیافتی داغ نیز بهتر است و در این میان عملکرد مخلوط ساسوبیتی، بهتر از سایر نمونه‌ها بوده است [۱۹]. در پژوهش دیگری که بهبهانی و همکاران در سال ۱۳۹۵ انجام دادند، عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با دو افزودنی گرم متفاوت زایکوترم و ساسوبیت مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. طبق بررسی نتایج آزمایش‌های انجام‌گرفته، نانو ماده زایکوترم استفاده شده در این پژوهش، علاوه بر کاهش دمای ساخت مخلوط آسفالتی، حساسیت رطوبتی مخلوط را نیز بهبود می‌بخشد، به گونه‌ای که میزان حساسیت رطوبتی مخلوط گرم ساخته شده با زایکوترم، کمتر از مخلوط آسفالتی داغ کنترلی و مخلوط حاوی ساسوبیت می‌باشد. در مخلوط گرم ساخته شده با ساسوبیت، سختی مخلوط افزایش یافته است و میزان مدول برجهندگی مخلوط ساسوبیتی، از مخلوط حاوی زایکوترم و مخلوط داغ کنترلی، بیشتر است. همچنین میزان شیار

های بازیافتی، مقدار کمتری از مقاومت مخلوط تازه بوده است. این امر نشان می‌دهد هنگامی که از مصالح خرده آسفالت استفاده می‌شود، احتمال بروز ترک بیشتر می‌شود. کلیه مخلوط‌های بازیافتی، مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط داغ تازه داشته‌اند و در این میان مخلوط‌های ساسوبیتی و رئوفالیتی، بیشترین مدول را داشته‌اند و بیشترین مدول مربوط به مخلوط ساسوبیتی می‌باشد. افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت در نمونه‌های بازیافتی، موجب افزایش مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی شده است، به طوری که نمونه‌های گرم ساسوبیتی و رئوفالیتی حتی عملکرد بهتری نسبت به مخلوط بازیافتی داغ داشته است. مصالح خرده آسفالت و افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت، موجب افزایش مقاومت مخلوط در برابر شیار شدگی می‌شود. عملکرد شیار شدگی مخلوط‌های

جدول ۲. دانه‌بندی شماره ۴ نشریه شماره ۲۳۴
Table 2. Number 4 continuous gradation

درصد مانده	متوسط عبوری	درصد وزنی عبوری	اینچ	شماره الک	میلی‌متر
۰	۱۰۰	۱۰۰	$\frac{3}{4}$	-	۱۹
۵	۹۵	۱۰۰-۹۰	$\frac{1}{2}$	-	۱۲/۵
-	-	-	$\frac{3}{8}$	-	۹/۵
۳۶	۵۹	۷۴-۴۴	-	۴	۴/۷۵
۱۶	۴۳	۵۸-۲۸	-	۸	۲/۳۶
-	-	-	-	۱۶	۱/۱۸
-	-	-	-	۳۰	۰/۶
۳۰	۱۳	۲۱-۵	-	۵۰	۰/۳
-	-	-	-	۱۰۰	۰/۱۵
۷	۶	۱۰-۲	-	۲۰۰	۰/۰۷۵

جدول ۳. مشخصات آزمایشگاهی قیر بکار رفته در این پژوهش

Table 3. Bitumen tests results

عنوان	استاندارد روش آزمایش	حدود مجاز نشریه ۲۳۴	نتیجه برای قیر مصرفی
وزن مخصوص قیر (gr/cm ³)	ASTM D70 , AASHTO T228	-	۱/۰۱۷
درجه نفوذ قیر (0.1mm)	ASTM D5 , AASHTO T49	۶۰-۷۰	۶۷
نقطه نرمی قیر (°C)	ASTM D36 , AASHTO T53	۴۹-۵۶	۵۱
کشش پذیری (انگمی) قیر (cm)	ASTM D113 , AASHTO T51	حداقل ۱۰۰	+۱۰۰
درجه اشتعال قیر (°C)	ASTM D92 , AASHTO T48	حداقل ۲۳۲	۳۰۴
کندروانی قیر (sec)	ASTM D88 , AASHTO T72	-	۹۲
افت وزنی قیر در اثر حرارت (%)	ASTM D1754 , AASHTO T179	حداکثر ۰/۸	۰/۳

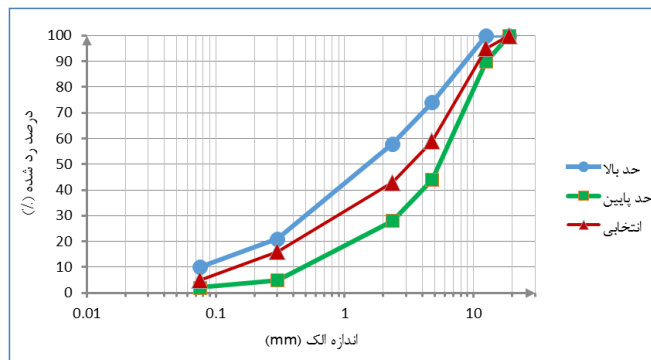
و ماسه اسب چران (کارخانه آسفالت کندوان پارس)، واقع در شهرستان رودهن در ۱۵ کیلومتری شمال شرقی شهر تهران تهیه شده است که از نوع سنگ‌دانه‌های شکسته آهکی می باشد. نتایج آزمایش مربوط به این مصالح سنگی، در جدول ۱ آمده است.

۳-۱-۱- دانه‌بندی مصالح سنگی

پس از الک کردن مصالح سنگی، جهت ساخت نمونه‌ها از حد وسط دانه بندی شماره چهار آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) استفاده شد. مشخصات الک‌های مورد استفاده و همچنین حدود دانه‌بندی موردنظر در جدول ۲ و شکل ۱ ارائه گردیده است.

۳-۲-۲- فیلر

فیلر (پرکن) به عنوان ریزدانه‌ترین بخش مخلوط آسفالتی، نقش مهمی را در رفتار مخلوط آسفالتی ایفا می کند. بویژه اینکه در چسبندگی، قفل و بست بین دانه‌ها و پر کردن فضای خالی بین



شکل ۱: حدود منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی طبق دانه‌بندی شماره چهار نشریه ۲۳۴

Fig. 1. Aggregate gradation

شدگی^۱ نیز در این مخلوط از دو مخلوط دیگر کمتر است [۲۰].

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش با استفاده از تکنیک آسفالت گرم، با ترکیب ۳ مقدار مختلف خرده آسفالت (۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ وزن مصالح سنگی مخلوط) و همچنین ۴ مقدار مختلف افزودنی پارافایبر (۰٪، ۰/۰۶٪، ۰/۱۲٪ و ۰/۱۸٪ وزن مصالح سنگی مخلوط)، ۱۲ نوع مخلوط آسفالتی ساخته شده است. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی، از متراکم کننده چرخشی (ژیتراتوری) استفاده گردید. پس از ترکیب مصالح با قیر و افزودنی، مخلوط درون قالب ژیراتوری ریخته می شود و با تنظیم دستگاه ژیراتوری و وارد کردن اطلاعات ورودی مورد نیاز، دستگاه شروع به تراکم مخلوط نموده و در پایان با توجه به میزان فضای خالی مورد نظر، مخلوط متراکم شده آماده می گردد. در این مطالعه برای ساخت نمونه‌های آسفالتی، میزان فضای خالی ۴٪ در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و خستگی، عملکرد انواع مخلوط‌ها ارزیابی و مقایسه گردید.

۳- مصالح و مواد استفاده شده

در این قسمت، مصالح بکار رفته در ساخت نمونه‌ها شامل مصالح سنگی جدید، فیلر و خرده آسفالت و همچنین مواد بکار رفته شامل قیر، افزودنی گرم و افزودنی الیاف پارافایبر معرفی می شوند.

۳-۱- مصالح سنگی جدید

مصالح سنگی جدید مورد نیاز این پژوهش، از معدن شن

جدول ۴. مشخصات افزودنی گرم کائوواکس

Table 4. WMA additive properties

ویژگی	توضیح
مقدار آمین کل (mg KOH/g)	حداکثر ۱۰
مقدار اسید (mg KOH/g)	حداکثر ۱۰
شکل ظاهری در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	جامد گرانولی
نقطه ذوب (°C)	۱۱۱-۱۱۷

که به مخلوط اضافه می شود، به عنوان افزودنی گرم در ساخت نمونه ها استفاده شد. کائوواکس به عنوان یک افزودنی گرم شیمیایی، دمای تولید و تراکم را بیش از ۲۵ درجه سانتی گراد کاهش می دهد و موجب بهبود مشخصات رئولوژیکی قیر می شود، همچنین خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی را نیز بهبود می بخشد. نحوه افزودن این افزودنی نیز بدین شکل است که ابتدا قیر تا دمای ۱۱۷ درجه سانتی گراد گرم می شود و به مقدار مورد نظر از افزودنی به قیر گرم اضافه می شود و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۱۷ درجه سانتی گراد با استفاده از یک همزن ساده، ترکیب می شوند. یکی از برتری های این افزودنی نسبت به سایر افزودنی های مشابه، ترکیب آسان تر آن است که با استفاده از یک همزن ساده با قیر ترکیب می شود. در جدول ۴ بخشی از خصوصیات این افزودنی آمده است [۲۲].

۳-۵- افزودنی الیاف پارافایبر

مطابق بررسی پژوهش های انجام شده در خصوص استفاده از این افزودنی، استفاده از پارافایبر رویه های مقاوم تری ایجاد می کند و باعث افزایش طول عمر روسازی آسفالتی می شود. آسفالت مسلح شده با این الیاف، مقاومت کششی و مدول برجهنگی بالاتری دارد و در برابر ترک های خستگی، شیارشدگی و خزش، مقاومت مناسب

سنگدانه ها تأثیر زیادی دارد. علاوه بر این می تواند بر روانی، حساسیت رطوبتی، سختی، دوام، عمر خستگی، شیار شدگی و... مخلوط آسفالتی نیز تأثیر گذار باشد. یکی از مهم ترین نقش های فیلر در مخلوط آسفالتی، افزایش عمر روسازی و ازدیاد مقاومت آن در برابر نفوذ آب است. علاوه بر این، استفاده از فیلر در مخلوط آسفالتی سبب ازدیاد قدرت باربری، کاهش تغییر شکل نسبی، افزایش مقاومت در برابر ضربه و افزایش مقاومت فشاری می شود [۲۱]. در این مطالعه، از پودر سنگ معدن ساوه، پس از عبور از الک شماره ۲۰۰ به عنوان فیلر استفاده شده است.

۳-۳- قیر

در این پژوهش از قیر ۶۰-۷۰ برای ساخت نمونه های آسفالتی استفاده شده است. این قیر از شرکت ملی نفت پاسارگاد تهیه گردید و خصوصیات آن در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۴- افزودنی گرم

از میان انواع افزودنی های گرم، کائوواکس کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به همین دلیل در این پژوهش از کائوواکس به عنوان افزودنی گرم استفاده گردید. پس از بررسی پژوهش های انجام شده، از این افزودنی به مقدار ۲٪ وزن قیر جدیدی

جدول ۵. مشخصات افزودنی پارافایبر به کاررفته در این پژوهش

Table 5. Para-fiber additive characteristics

ویژگی	توضیح
رنگ	سفید
چگالی (gr/cm^3)	۱/۱ - ۲/۷
طول (mm)	۶-۱۹
نمره نخ (وزن ۱۰۰۰۰ متر از الیاف برحسب کیلوگرم)	۵-۱۲
مقاومت کششی (MPa)	۷۵۰-۱۱۰۰
نقطه ذوب (°C)	۲۳۰-۴۵۰
جذب آب	ندارد

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های طرح اختلاط مارشال جهت تعیین مقادیر قیر بهینه

Table 6. Results of Marshall mixing design experiments

نوع مخلوط	VMA (%)		VFA (%)		درصد فضای خالی نمونه		روانی نمونه (mm)	
	حدود مجاز	نتیجه	حدود مجاز	نتیجه	حدود مجاز	نتیجه	حدود مجاز	نتیجه
بدون خرده آسفالت	حداقل ۱۴	۱۵/۱۵	۷۵-۶۵	۷۲/۸	۵-۳	۴/۰۹	۳/۵-۲	۳/۳
شامل ۵۰٪ خرده آسفالت	حداقل ۱۴	۱۹/۲۷	۷۵-۶۵	۷۳/۶	۵-۳	۴/۷۸	۳/۵-۲	۳/۱۹
شامل ۱۰۰٪ خرده آسفالت	حداقل ۱۴	۱۹/۷۸	۷۵-۶۵	۷۴/۷	۵-۳	۴/۸۲	۳/۵-۲	۲/۹

برداشت روسازی قدیمی بزرگراه صیاد شیرازی تهران، تهیه گردیده است که با توجه به اطلاعات موجود، این روسازی از مصالح سنگی کوهی و قیر ۷۰-۶۰ ساخته شده است. **۳-۷-۱ محاسبه درصد قیر موجود در خرده آسفالت** در این پژوهش از دستگاه سانتریفیوژ طبق استاندارد ASTM D2172 برای تجزیه آسفالت و جداسازی قیر از مصالح استفاده گردید و بنزین به‌عنوان حلال به‌کاربرده شد [۲۵]. این آزمایش سه مرتبه تکرار شد و میزان قیر موجود در مصالح خرده آسفالت، برابر با مقدار ۵/۱۹ درصد، تعیین گردید.

۴- محاسبه درصد قیر بهینه

در این پژوهش از روش مارشال برای تعیین میزان قیر بهینه در مخلوط استفاده گردید. وزن مصالح سنگی مورد نظر، ۱۲۰۰ گرم و دارای درصد قیرهای، ۴ تا ۶/۵ درصد (با اختلاف مقدار ۰/۵ درصد) بودند که از هرکدام سه نمونه تهیه گردید. هریک از مخلوط های آسفالتی ساخته شده، درون قالب مارشال استوانه ای به قطر ۴ اینچ ریخته شده و سپس زیر چکش اتوماتیک مارشال قرار گرفت (جدول ۶). چکش اتوماتیک مارشال را تنظیم کرده که به هر دو طرف ۷۵ ضربه وارد کند. جهت تعیین میزان قیر بهینه برای هریک از انواع مخلوط های آسفالتی مورد نظر، ابتدا با توجه به مقاومت مارشال نمونه ها، درصد قیری که بیشترین مقاومت را داشته، تعیین

تری نسبت به نمونه های آسفالتی شاهد، ایجاد می‌کند. لذا در این پژوهش از افزودنی پارافینر، به مقدارهای مختلف (۰٪، ۰/۰۶٪، ۰/۱۲٪ و ۰/۱۸٪ وزن مصالح سنگی مخلوط) برای بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی استفاده شد. این افزودنی قبل از آنکه قیر با مصالح سنگی ترکیب شود، با مصالح سنگی گرم شده ترکیب می‌شود و سپس قیر گرم نیز با مخلوط مصالح سنگی و الیاف ترکیب می‌شود. در جدول ۵ بخشی از مشخصات این افزودنی آمده است [۲۳، ۲۴].

۳-۶ جوان ساز

از نانو پلی به مقدار ۲/۵٪ وزن قیر موجود در خرده آسفالت، به عنوان جوان‌کننده استفاده شد و به خرده آسفالت اضافه گردید. ابتدا به نانو پلی حرارت داده می‌شود تا دمای آن به ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برسد. سپس به خرده آسفالت گرم شده اضافه می‌شود و ترکیب می‌شوند. از خواص این افزودنی، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ◀ برگشت خصوصیات فیزیکی قیر پایه
- ◀ افزایش چسبندگی قیر در مخلوط های بازیافت شده
- ◀ افزایش خاصیت برگشت‌پذیری به قیر و نهایتاً مخلوط آسفالتی
- ◀ افزایش مقاومت در مقابل تنش های حرارتی

۳-۷ خرده آسفالت

مصالح خرده آسفالت استفاده شده در این پژوهش، از

جدول ۷. مقادیر درصد قیر بهینه برای مخلوط های ساخته شده با مقادیر مختلف خرده آسفالت

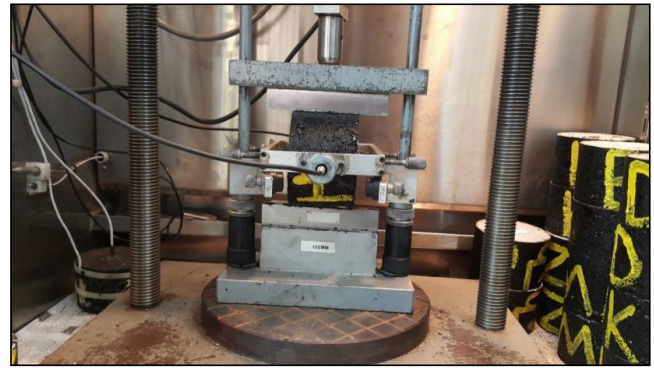
Table 7. Optimum quantity of bitumen

میزان قیر بهینه (قیر جدید + قیر موجود در خرده آسفالت)	ترکیب مخلوط
۵/۱۴٪	مخلوط گرم ساخته شده از مصالح سنگی جدید
۵/۴۷٪	مخلوط گرم ساخته شده از ۵۰٪ مصالح سنگی جدید و ۵۰٪ خرده آسفالت
۵/۹۱٪	مخلوط گرم ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده آسفالت

های ساخته شده انجام گردیدند که در ادامه فرآیند انجام هر آزمایش، بررسی می گردد. در هر آزمایش برای هر نوع مخلوط آسفالتی، ۳ نمونه ساخته شد. با توجه به اینکه ۱۲ نوع مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت، برای هر آزمایش ۳۶ نمونه ساخته شد. در این پژوهش برای انجام ۳ آزمایش مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و خستگی قطری، در مجموع ۱۰۸ نمونه ساخته شد.

۵-۱- آزمایش مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی طبق استاندارد ASTM D4123-82 با بارگذاری تکراری انجام می شود. این استاندارد پیشنهاد می کند که مدول برجهندگی توسط تنش هایی با مقادیری در بازه ۱۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ها اندازه گیری شود. به علت اینکه بار اعمال شده و تغییر شکل ناشی از آن در نمونه مخلوط آسفالتی در مقایسه با مقاومت مصالح کوچک می باشد، آزمایش مدول برجهندگی یک آزمایش غیر مخرب بوده و از این نمونه ها می توان برای سایر آزمایش ها تحت شرایط بارگذاری و دمای متفاوت استفاده نمود. نوع و مدت زمان اعمال بار در آزمایش مدول برجهندگی باید شرایط موجود در محل را شبیه سازی نماید. هنگامی که بار چرخ در فاصله ای دور از یک نقطه وارد می شود تنش در آن نقطه برابر صفر خواهد بود و هنگامی که بار در بالای آن نقطه وارد می شود، میزان تنش به حداکثر خود خواهد رسید. بنابراین بارگذاری به صورت شبه سینوسی در نظر گرفته می شود. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت پیش از انجام آزمایش در دمای ۲۵

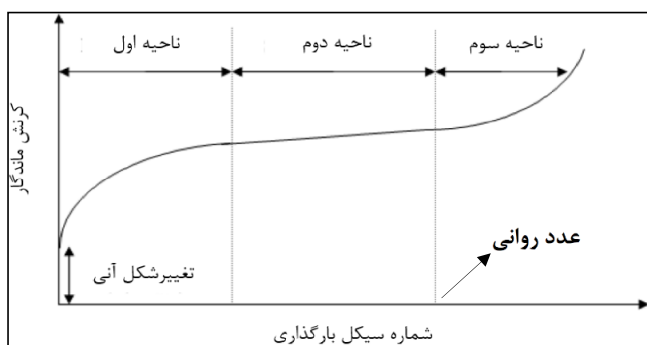


شکل ۲. تصویری از نحوه قرارگیری نمونه در آزمایش مدول برجهندگی
Fig. 2. A picture of how to place a specimen in the resilient modulus test

می گردد. همچنین با توجه به وزن مخصوص آسفالت، درصد قیری که بیشترین وزن مخصوص آسفالت را در پی دارد نیز تعیین می گردد. حال میانگین این دو مقدار در نظر گرفته می شود. سپس مقدار مورد نظر، با چهار مقدار درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA) و فضای خالی نمونه و وارفتگی نمونه، طبق محدودیت های نشریه شماره ۲۳۴، مقایسه می شود. اگر شرایط لازم طبق آیین نامه را نداشت، میزان درصد قیر را کاهش داده تا شرایط مورد نظر برقرار گردد. میزان قیر بهینه به دست آمده برای هریک از انواع مخلوط ها، در جدول ۷ آورده شده است.

۵- آزمایش های انجام شده

جهت مقایسه و بررسی عملکرد مخلوط های آسفالتی، آزمایش های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و خستگی بر روی نمونه



شکل ۴. منحنی کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش خزش [۳۰]

Fig. 4. Cumulative strain curve versus number of loading cycles in dynamic creep test



شکل ۳. تصویری از نحوه قرارگیری نمونه در آزمایش خزش دینامیکی
Fig. 3. A picture of how to place a specimen in the dynamic creep test

جدول ۸. ترکیب آسفالت های مورد استفاده برای انواع نمونه های مورد بررسی و علامت اختصاری هر یک

Table 8. Asphalt composition used for all types of specimens studied

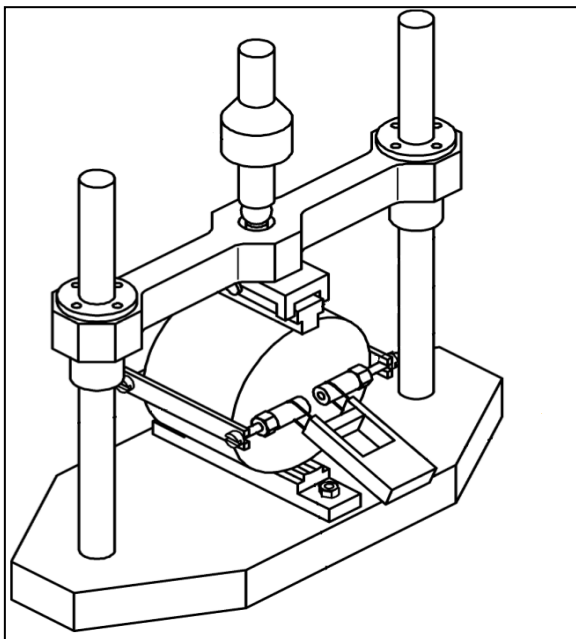
علامت اختصاری	ترکیب مخلوط	نوع
ROP0	مخلوط گرم ساخته شده از مصالح سنگی جدید، بدون افزودنی الیاف پارافایبر	۱
ROP6	مخلوط گرم ساخته شده از مصالح سنگی جدید، به همراه ۰/۰۶٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۲
R0P12	مخلوط گرم ساخته شده از مصالح سنگی جدید، به همراه ۰/۱۲٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۳
R0P18	مخلوط گرم ساخته شده از مصالح سنگی جدید، به همراه ۰/۱۸٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۴
R50P0	مخلوط گرم ساخته شده از ۵۰٪ مصالح سنگی جدید و ۵۰٪ خرده آسفالت، بدون افزودنی الیاف پارافایبر	۵
R50P6	مخلوط گرم ساخته شده از ۵۰٪ مصالح سنگی جدید و ۵۰٪ خرده آسفالت، به همراه ۰/۰۶٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۶
R50P12	مخلوط گرم ساخته شده از ۵۰٪ مصالح سنگی جدید و ۵۰٪ خرده آسفالت، به همراه ۰/۱۲٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۷
R50P18	مخلوط گرم ساخته شده از ۵۰٪ مصالح سنگی جدید و ۵۰٪ خرده آسفالت، به همراه ۰/۱۸٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۸
R100P0	مخلوط گرم ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده آسفالت، بدون افزودنی الیاف پارافایبر	۹
R100P6	مخلوط گرم ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به همراه ۰/۰۶٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۱۰
R100P12	مخلوط گرم ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به همراه ۰/۱۲٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۱۱
R100P18	مخلوط گرم ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به همراه ۰/۱۸٪ وزن سنگدانه‌ها افزودنی الیاف پارافایبر	۱۲

میلی ثانیه و کل زمان هر سیکل ۲۰۰۰ میلی ثانیه لحاظ گردید. مقدار تنش وارده نیز طبق استاندارد مورد نظر، ۲۰۰ کیلو پاسکال اعمال شد. نتایج این آزمایش به صورت منحنی کرنش تجمعی در برابر سیکل بارگذاری می‌باشد. شکل ۴ نمونه ای از منحنی کرنش تجمعی در برابر سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که

درجه سانتی گراد نگهداری شده و آزمایش نیز در این دما و تحت بار ۴۰۰ نیوتن، انجام شد. در شکل ۲، نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه جهت تعیین مدول برجهندگی آسفالت، نشان داده شده است.

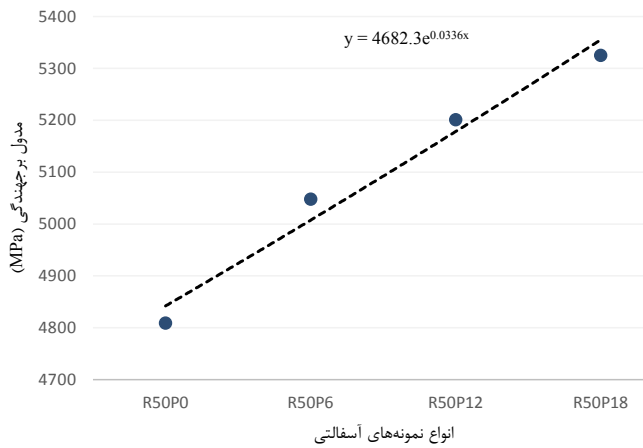
۵-۲- آزمایش خزش دینامیکی

شیارشدهگی یکی از اصلی‌ترین خرابی های روسازی آسفالتی است که به دلیل حرکت مکرر وسایل نقلیه سنگین بر روی لایه های روسازی یا ضعف بستر به وجود می آید. شیارشدهگی یک خرابی سازه ای در نظر گرفته نمی شود اما می تواند سبب بروز خطرات جدی برای وسایل نقلیه شود. عوامل زیادی مانند شرایط محیطی (دمای بالا)، سرعت وسایل نقلیه و فشار تماسی لاستیک می توانند در به وجود آمدن این خرابی دخیل باشند [۲۶]. مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر تغییر شکل دائم را می توان با استفاده از آزمون خزش تکراری تعیین کرد. در آزمایش خزش دینامیکی، تنش تک‌محوره پالسی مکرر بر روی یک نمونه آسفالت اعمال و تغییر شکل حاصل در همان جهت با استفاده از مبدل‌های دیفرانسیل خطی متغیر اندازه‌گیری می شود [۲۷، ۲۸]. آزمایش خزش دینامیکی مطابق استاندارد استرالیا AS2891.12.1 انجام شد. نمونه ها به مدت ۸ ساعت پیش از انجام آزمایش در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد نگهداری شده و آزمایش نیز در این دما انجام شد (شکل ۳). در این آزمایش، شکل بارگذاری به صورت مستطیل انتخاب شد. زمان بارگذاری ۵۰۰



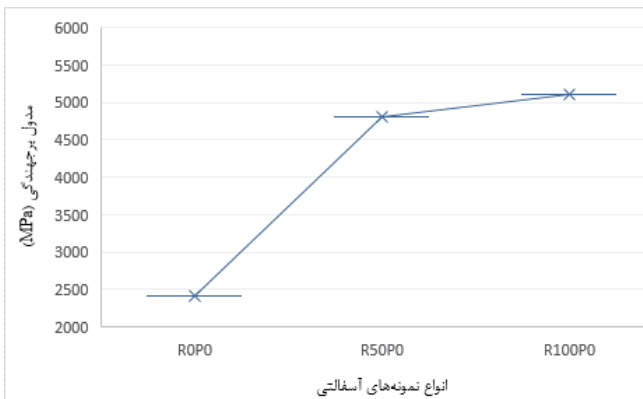
شکل ۵. تصویری شماتیک از نحوه قرارگیری نمونه در آزمایش خستگی قطری [۳۳]

Fig. 5. A picture of how to place a specimen in the fatigue test



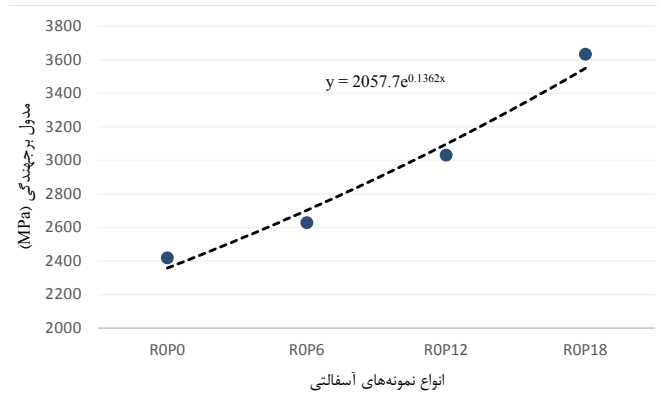
شکل ۷. نمودار نتایج مربوط به مدول برجهندگی انواع نمونه های آسفالتی حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 7. Diagram of results for the resilient modulus of specimens containing 50% RAP and different amounts of Para-fiber



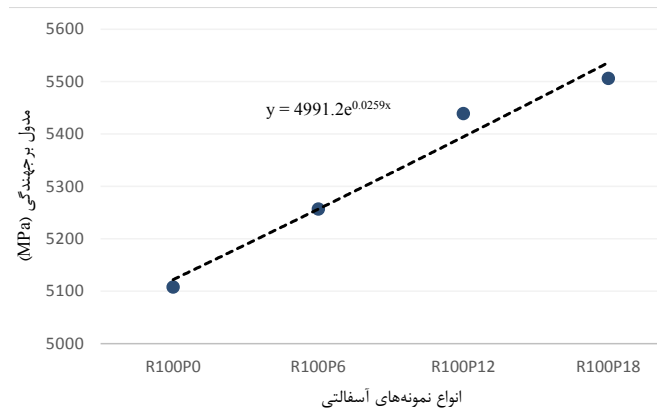
شکل ۹. نمودار نتایج مربوط به مدول برجهندگی انواع نمونه های آسفالتی فاقد پارافایبر

Fig. 9. Diagram of results for the resilient modulus of specimens without Para-fiber



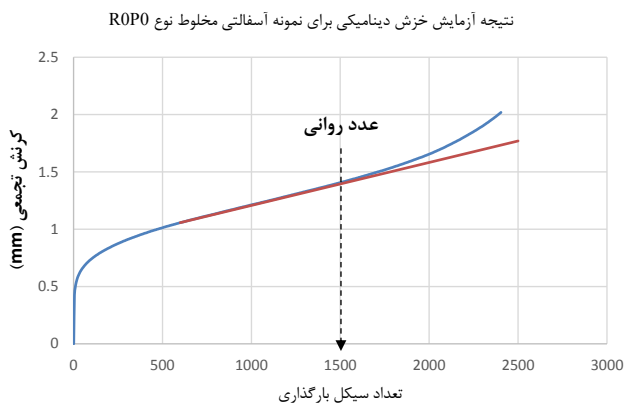
شکل ۶. نمودار نتایج مربوط به مدول برجهندگی انواع نمونه های آسفالتی فاقد خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 6. Diagram of results for the resilient modulus of specimens without RAP and containing different amounts of Para-fiber



شکل ۸. نمودار نتایج مربوط به مدول برجهندگی انواع نمونه های آسفالتی حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 8. Diagram of results for the resilient modulus of specimens containing 100% RAP and different amounts of Para-fiber



شکل ۱۱. نمونه‌ای از نتیجه آزمایش خزش دینامیکی

Fig. 11. An example of a dynamic creep test result



شکل ۱۰. نمونه‌ای از نتیجه آزمایش خزش دینامیکی

Fig. 10. An example of a dynamic creep test result

شکل بارگذاری، سبب تنش کششی یکنواخت در نمونه شده که عمود بر جهت بارگذاری و در طول نمونه استوانه خواهد بود [۳۲]. این آزمایش از نظر اجرائی ساده و جهت بیان ویژگی آسفالت روش مؤثری است. محققین مختلفی این شکل آزمایش را برای ارزیابی عمر خستگی آسفالت و آنالیز روسازی بکار برده‌اند. نمونه های آزمایش معمولاً دارای قطری برابر ۴ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ بوده و عرض نوار بارگذاری بر کناره های نمونه استوانه‌ای برابر ۰/۵ اینچ می باشد [۳۱]. در این آزمایش که طبق استاندارد BS EN 12697-24 انجام گردید، بار به صورت تنش ثابت اعمال شد که در آن بار تکراری وارد شده باعث افزایش کرنش کششی و ترک خوردن و در نهایت خراب شدن نمونه آزمایش می شود. بار شبه سینوسی به صورت تکراری و با ۰/۱ ثانیه زمان بارگذاری و ۰/۴ ثانیه زمان استراحت یا باربرداری، اعمال گردید [۳۳]. این آزمایش نیز با استفاده از دستگاه UTM موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران، انجام گردید. در شکل ۵، تصویری شماتیک از نحوه قرارگیری نمونه درون دستگاه مشاهده می شود.

۶- نتایج و تفسیر آزمایش‌ها

در این قسمت، نتایج هر یک از آزمایش های انجام شده بر روی نمونه ها آورده شده است. نتایج نمونه های مختلف، به صورت جدول و نمودار با یکدیگر مقایسه شده اند و عملکرد انواع مخلوط های آسفالتی تحلیل و بررسی شده است. با توجه به این که در نمودارها و جدول ها، علائم اختصاری هر نوع آسفالت به کار برده شده است، علائم اختصاری هر یک از انواع مخلوط های آسفالتی در جدول ۸ آورده شده است.

۶-۱- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی در جدول ۹ آورده شده است. نتایج آزمایش مدول برجهندگی در نمونه های فاقد خرده آسفالت، ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد خرده آسفالت و با مقادیر مختلف الیاف پارافایبر، به ترتیب در شکل های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج آزمایش مدول برجهندگی، افزودن پارافایبر به مخلوط موجب افزایش مدول برجهندگی مخلوط می گردد که دلیل آن را می توان افزایش انعطاف پذیری مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن الیاف پارافایبر دانست. میزان تأثیر پارافایبر برافزایش

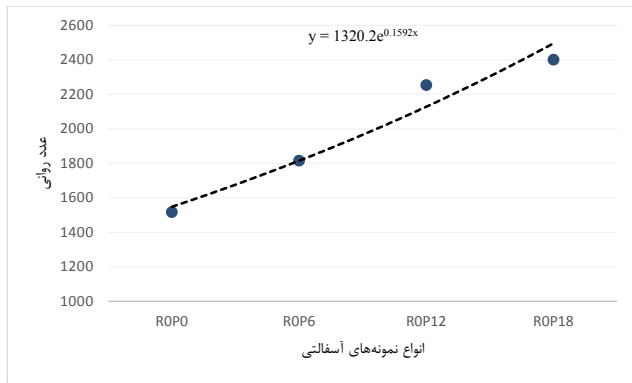
جدول ۹. مقدار متوسط مدول برجهندگی برای هر یک از انواع مخلوط های آسفالتی
Table 9. Average amount of resilient modulus for each type of asphalt mixture

نوع مخلوط آسفالتی	مقدار مدول برجهندگی (MPa)
ROP0	۲۴۱۹
ROP6	۲۶۲۸
R0P12	۳۰۳۱
R0P18	۳۶۳۲
R50P0	۴۸۰۹
R50P6	۵۰۴۸
R50P12	۵۲۰۱
R50P18	۵۳۲۵
R100P0	۵۱۰۸
R100P6	۵۲۵۷
R100P12	۵۴۳۹

دیده می شود این نمودار به سه ناحیه تقسیم می شود. در ناحیه اول تغییرمکان های دائم به طور ناگهانی بر روی هم انباشته می شوند. در ناحیه دوم افزایش روند (شیب) تغییرمکان دائم کاهش می یابد و در ناحیه سوم شیب تغییرمکان دوباره افزایش می یابد و مقدار تغییرمکان دائم به شدت روی هم انباشته می شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عنوان عدد روانی شناخته می شود [۲۹].

۵-۳- آزمایش خستگی قطری (خستگی به روش کشش غیرمستقیم)

مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر خستگی یکی از مهم ترین خصوصیات مصالح آسفالتی می باشد که در طراحی روسازی های انعطاف پذیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. زمانی که یک روسازی انعطاف پذیر تحت تأثیر بارهای تکراری ناشی از وسایل نقلیه قرار می گیرد، لایه روسازی به صورت یک تیر خمشی عمل نموده و در زیر بار چرخ و در سطح روسازی تنش های فشاری و در پایین ترین لایه آسفالتی، تنش ها و یا کرنش های کششی به وجود می آید. چنانچه تنش ها و یا کرنش ها از تنش ها و کرنش های مجاز کششی آن لایه آسفالتی تجاوز نماید، منجر به ایجاد ترک هایی در زیر لایه آسفالتی می گردد که در نهایت به سطح روسازی انتقال می یابد. از تجمع و به هم پیوستن این ترک ها در سطح روسازی، ترک های پوست سوسماری یا ترک های خستگی به وجود می آید [۳۱]. در آزمایش خستگی قطری، بارگذاری به صورت تکراری بر یک نمونه استوانه ای وارد می شود، به طوری که تنش فشاری موازی با ارتفاع استوانه و به صورت قائم اعمال می شود. این



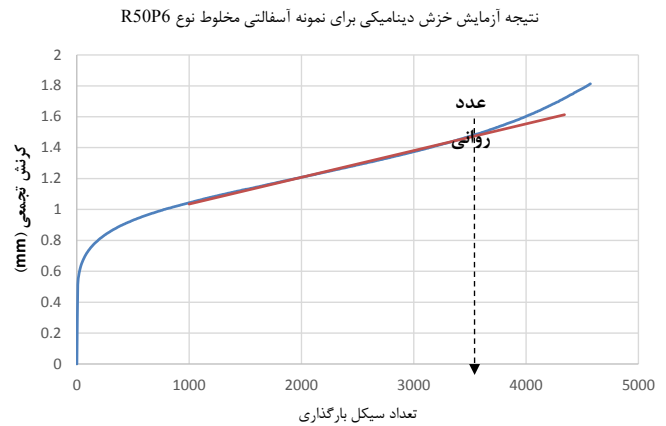
شکل ۱۳: نمودار نتایج مربوط به عدد روانی انواع نمونه‌های آسفالتی فاقد خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 13. Diagram of results for the flow number of specimens without RAP and containing different amounts of Para-fiber

پارافایبر در افزایش مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل دائمی، با افزایش مقدار خرده آسفالت، افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که اضافه کردن پارافایبر به مخلوط حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت، تأثیر بیشتری را در افزایش عدد روانی نسبت به نمونه حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و بدون خرده آسفالت دارد. در مخلوط‌های بدون خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عدد روانی به‌طور متوسط ۱۶/۸٪ افزایش می‌یابد. در مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عدد روانی به‌طور متوسط به ترتیب ۳۶/۳٪ و ۲۹/۴٪ افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار بالا مشخص است، با اضافه کردن خرده آسفالت نیز عدد روانی به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. به‌خصوص در مخلوط‌های حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت، عدد روانی بسیار بیشتر از سایر مخلوط‌ها می‌باشد. به نظر می‌رسد افزودن خرده آسفالت، کاهش تغییر شکل‌های ماندگار را در مخلوط آسفالتی در پی خواهد داشت و به واسطه همین موضوع، عدد روانی افزایش می‌یابد.

۳-۶- نتایج آزمایش خستگی

نتایج آزمایش خستگی در جدول ۱۱ آورده شده است. مانند دو آزمایش قبل، در سه شکل ۱۷، ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نتایج آزمایش خستگی قطری نمونه‌های مسلح شده با الیاف در سه حالت بدون خرده آسفالت، پنجاه و صددرصد خرده آسفالت ارائه شده است. طبق نتیجه آزمایش خستگی که در شکل‌های بالا آمده است، افزودن پارافایبر موجب افزایش عمر خستگی مخلوط می‌گردد و عمر خستگی آسفالت را بهبود می‌بخشد که دلیل آن را می‌توان افزایش

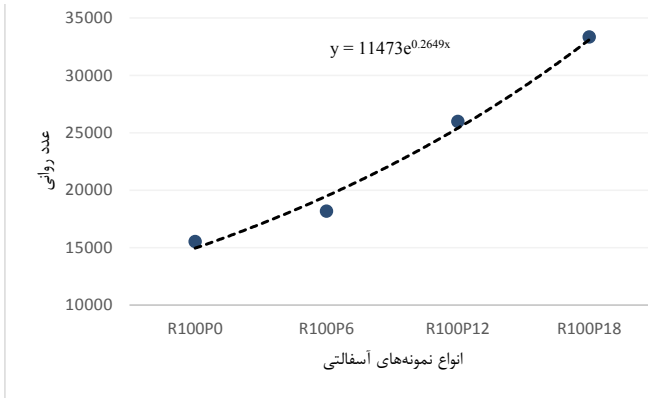


شکل ۱۲. نمونه‌ای از نتیجه آزمایش خزش دینامیکی
Fig. 12. An example of a dynamic creep test result

مدول برجهندگی مخلوط، با افزایش مقدار خرده آسفالت در مخلوط، کاهش می‌یابد. در مخلوط بدون خرده آسفالت، پارافایبر بیشترین تأثیر را در افزایش مدول برجهندگی مخلوط دارد و در مخلوط حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت، تأثیر پارافایبر برافزایش مدول برجهندگی مخلوط، بسیار کمتر است. در مخلوط‌های بدون خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، مقدار مدول برجهندگی به‌طور متوسط ۱۴/۶٪ افزایش می‌یابد. در مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، مقدار مدول برجهندگی به‌طور متوسط ۳٪ افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، با اضافه کردن خرده آسفالت، مدول برجهندگی به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، که می‌تواند به دلیل بالا رفتن سختی مخلوط باشد. استفاده از ۵۰٪ خرده آسفالت، تأثیر مشابهی با آسفالت حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت دارد و مقدار مدول برجهندگی آن‌ها بسیار به هم نزدیک است.

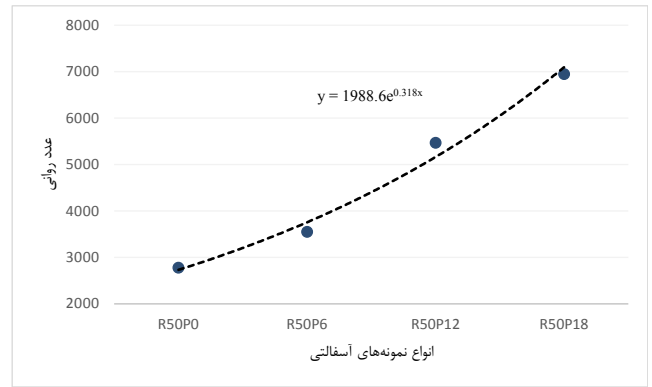
۲-۶- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

نتایج آزمایش خزش دینامیکی در جدول ۱۰ آورده شده است. مطابق حالت قبل، نتایج آزمایش خزش نمونه‌های مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پارافایبر و حاوی صفر، پنجاه و صددرصد خرده آسفالت، به ترتیب در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ و نتایج نمونه‌های فاقد الیاف در شکل ۱۶ ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده، با افزودن پارافایبر، عدد روانی مخلوط نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان افزایش مقاومت برشی مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن پارافایبر دانست. میزان تأثیر



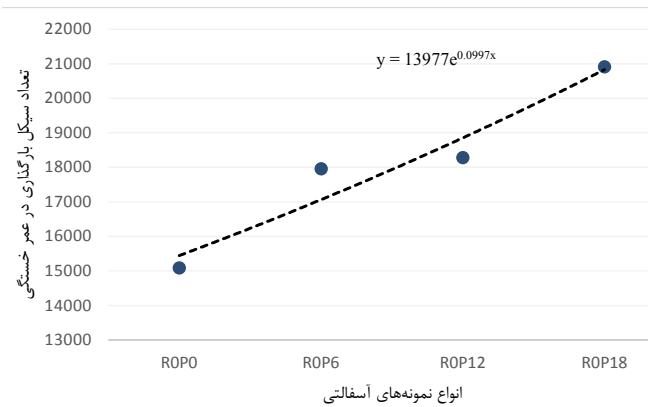
شکل ۱۵. نمودار نتایج مربوط به عدد روانی انواع نمونه های آسفالتی حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 15. Diagram of results for the flow number of specimens containing 100% RAP and different amounts of Para-fiber



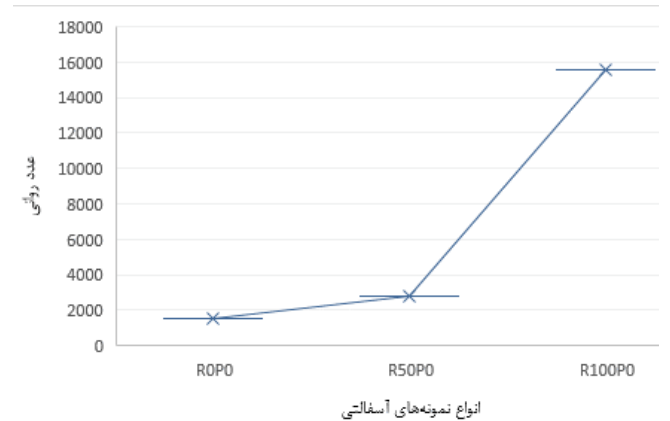
شکل ۱۴. نمودار نتایج مربوط به عدد روانی انواع نمونه های آسفالتی حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 14. Diagram of results for the flow number of specimens containing 50% RAP and different amounts of Para-fiber



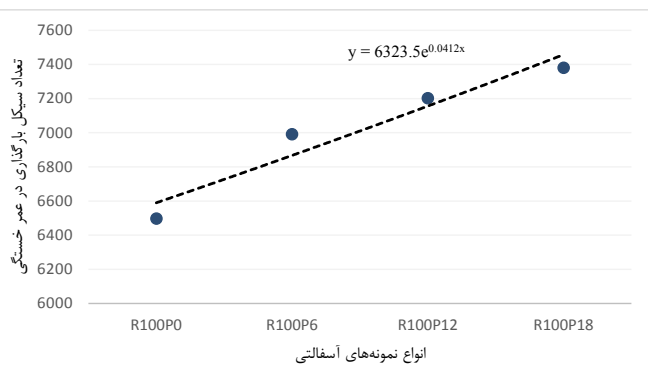
شکل ۱۷. نمودار نتایج مربوط به عمر خستگی انواع نمونه های آسفالتی فاقد خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 17. Diagram of results for the fatigue life of specimens without RAP and containing different amounts of Para-fiber



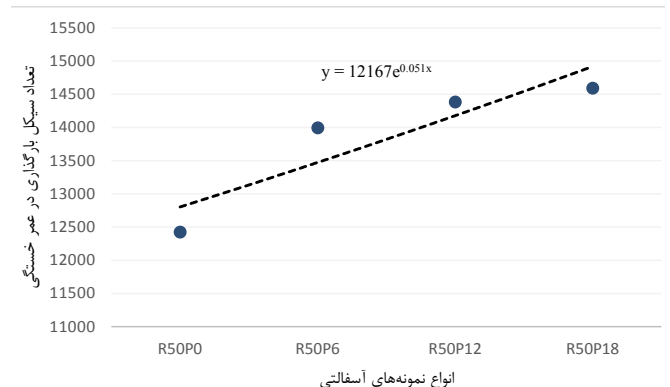
شکل ۱۶. نمودار نتایج مربوط به عدد روانی انواع نمونه های آسفالتی فاقد پارافایبر

Fig. 16. Diagram of results for the flow number of specimens without Para-fiber



شکل ۱۹. نمودار نتایج مربوط به عمر خستگی انواع نمونه های آسفالتی حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 19. Diagram of results for the fatigue life of specimens containing 100% RAP and different amounts of Para-fiber



شکل ۱۸. نمودار نتایج مربوط به عمر خستگی انواع نمونه های آسفالتی حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و حاوی مقادیر مختلف پارافایبر

Fig. 18. Diagram of results for the fatigue life of specimens containing 50% RAP and different amounts of Para-fiber

جدول ۱۰. مقدار متوسط عدد روانی برای هر یک از انواع مخلوط‌های آسفالتی

Table 10. Average amount of flow number for each type of asphalt mixture

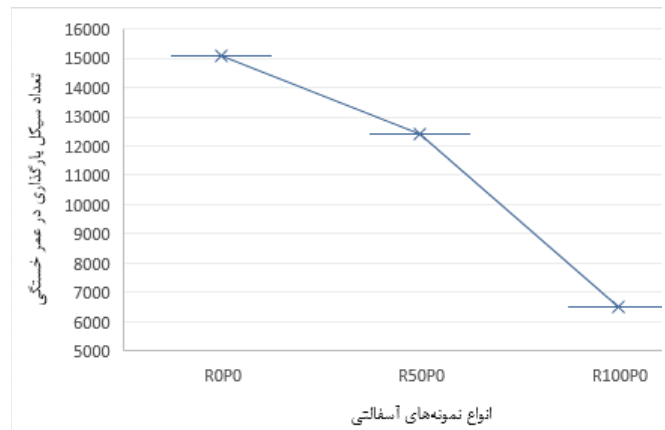
عدد روانی	نوع مخلوط آسفالتی
۱۵۱۸	R0P0
۱۸۱۶	R0P6
۲۲۵۴	R0P12
۲۴۰۱	R0P18
۲۷۸۲	R50P0
۳۵۵۲	R50P6
۵۴۷۲	R50P12
۶۹۵۲	R50P18
۱۵۵۴۱	R100P0
۱۸۱۷۶	R100P6
۲۶۰۰۶	R100P12
۳۳۳۵۲	R100P18

به واسطه افزودن خرده آسفالت باشد. بخصوص در مخلوط حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت عمر خستگی بسیار کاهش یافته است. لذا می توان با اضافه کردن پارافایبر به مخلوط حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت، بخش زیادی از این کاهش عمر خستگی را جبران کرد.

۷- نتیجه گیری

با توجه به ضرورت حفظ محیط زیست و تلاش برای کاهش آلودگی های زیست محیطی، در صنعت آسفالت نیز این موضوع بایستی برای طراحان مورد اهمیت بیشتری قرار گیرد. یکی از راهکارهای کاهش آلودگی های زیست محیطی در صنعت ساخت آسفالت، استفاده مجدد از آسفالت های قدیمی (بازیافت آسفالت) می باشد. همچنین استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم و کاهش دمای ساخت آسفالت موجب کاهش مصرف سوخت و در نتیجه حفظ منابع انرژی و کاهش آلودگی ناشی از مصرف سوخت می گردد. در این پژوهش، مخلوط های آسفالتی با استفاده ترکیبی از دو تکنولوژی بازیافت آسفالت و آسفالت گرم، تولید گردید و عملکرد آن با آزمایش های شرح داده شده، مورد بررسی قرار گرفت. از افزودنی کائوواکس به مقدار ۲٪ وزن قیر جدیدی که به مخلوط اضافه می شود، به عنوان افزودنی گرم در ساخت نمونه ها استفاده شد. در ادامه خلاصه نتایج عملکرد نمونه های مختلف آورده شده است:

< اضافه کردن خرده آسفالت موجب می شود مدول برجهندگی مخلوط به مقدار قابل توجهی افزایش یابد که می تواند به دلیل بالا رفتن سختی مخلوط باشد. مشابه آن چه که در قسمت مرور بر پژوهش های



شکل ۲۰. نمودار نتایج مربوط به عمر خستگی انواع نمونه های آسفالتی فاقد پارافایبر

Fig. 20. Diagram of results for the fatigue life of specimens without Para-fiber

مقاومت کششی مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن الیاف پارافایبر دانست. با بررسی نتایج مشخص است که میزان تأثیر پارافایبر بر عمر خستگی مخلوط، با افزایش مقدار خرده آسفالت، کاهش می یابد. به گونه ای که اضافه کردن پارافایبر به مخلوط بدون خرده آسفالت، تأثیر بیشتری را در افزایش عمر خستگی آسفالت نسبت به نمونه حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت دارد. در مخلوط های بدون خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عمر خستگی بطور متوسط ۱۱/۷٪ افزایش می یابد. در مخلوط های حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عمر خستگی بطور متوسط به ترتیب ۴/۴٪ و ۵/۶٪ افزایش می یابد. نتایج نمونه های فاقد الیاف و با مقادیر مختلف خرده آسفالت در شکل ۲۰ ارائه شده است. با اضافه کردن خرده آسفالت، عمر خستگی مخلوط به شدت کاهش می یابد که می تواند به دلیل افزایش سختی مخلوط آسفالتی

جدول ۱۱. مقدار متوسط تعداد سیکل بارگذاری در عمر خستگی برای هر یک از انواع مخلوط های آسفالتی

Table 11. Average amount of number of load applicationa for fracture life for each type of asphalt mixture

نوع مخلوط آسفالتی	تعداد سیکل بارگذاری در عمر خستگی
R0P0	۱۵۰۸۳
R0P6	۱۷۹۵۲
R0P12	۱۸۲۷۶
R0P18	۲۰۹۰۵
R50P0	۱۲۴۲۴
R50P6	۱۳۹۹۴
R50P12	۱۴۳۸۳

مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی، هرچه مقدار خرده آسفالت بیشتر شود مخلوط مقاوم تری حاصل می شود. اما با توجه به محدودیت مربوط به عمر خستگی آسفالت و کاهش شدید عمر خستگی در مخلوط حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت، استفاده از مخلوط حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت و افزودنی پارافایبر، مطلوب تر به نظر می رسد.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان لازم می دانند بدین وسیله از کارکنان محترم مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) به دلیل همکاری صمیمانه، تشکر و قدردانی نمایند.

۹- مراجع

- [1] Almeida-costa, A. Benta, Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt, J. Clean. Prod., 112 (2016) 2308–2317.
- [2] Lopez, A. Gonzalez, G. Thenoux, G. Sandoval, J. Marcobal, Stabilized emulsions to produce warm asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavements, J. Clean. Prod., 209 (2019) 1461–1472.
- [3] Gillespie, quantifying the energy used in an asphalt coating plant, University of Strathclyde, 2012.
- [4] H. Yu, Z. Leng, Z. Zhou, K. Shih, F. Xiao, Optimization of preparation procedure of liquid warm mix additive modified asphalt rubber, J. Clean. Prod., 141 (2017) 336–345.
- [5] G. Shiva Kumar, S.N. Suresha, State of the art review on mix design and mechanical properties of warm mix asphalt, Road Mater. Pavement Des. (2018).
- [6] Y. Sun, W. Wang, J. Chen, Investigating impacts of warm-mix asphalt technologies and high reclaimed asphalt pavement binder content on rutting and fatigue performance of asphalt binder through MSCR and LAS tests, J. Clean. Prod., 219 (2019) 879–893.
- [7] Kheradmand, R. Muniandy, L.T. Hua, R.B. Yunus, A. Solouki, An overview of the emerging warm mix asphalt technology, Int. J. Pavement Eng., (2013).
- [8] M.C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, F. Moreno, Warm mix

پیشین در مرجع [۱۹] گفته شد، در این پژوهش نیز افزودن خرده آسفالت موجب افزایش مدول برجهندگی مخلوط گردید. همچنین افزودن پارافایبر به مخلوط نیز موجب افزایش مدول برجهندگی مخلوط می گردد که دلیل آن را می توان افزایش انعطاف پذیری مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن پارافایبر دانست. در مخلوط های بدون خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، مقدار مدول برجهندگی به طور متوسط ۱۴/۶٪ افزایش می یابد. در مخلوط های حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، مقدار مدول برجهندگی بطور متوسط ۳٪ افزایش می یابد. < افزودن خرده آسفالت موجب افزایش چشم گیر عدد روانی مخلوط می شود. به نظر می رسد افزودن خرده آسفالت، کاهش تغییر شکل های ماندگار را در آسفالت در پی خواهد داشت و به واسطه همین موضوع، عدد روانی افزایش می یابد. مشابه آن چه که در قسمت مرور بر پژوهش های پیشین در مرجع [۱۶] گفته شد، در این پژوهش نیز افزودن خرده آسفالت موجب بهبود مقاومت خزشی مخلوط گردید. همچنین با اضافه کردن پارافایبر نیز مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل دائمی، بهبود می یابد که دلیل آن را می توان افزایش مقاومت برشی مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن پارافایبر دانست. در مخلوط های بدون خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عدد روانی به طور متوسط ۱۶/۸٪ افزایش می یابد. در مخلوط های حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عدد روانی به طور متوسط به ترتیب ۳۶/۳٪ و ۲۹/۴٪ افزایش می یابد. < عمر خستگی آسفالت با اضافه شدن مقدار خرده آسفالت در مخلوط، کاهش می یابد که می تواند به دلیل افزایش سختی مخلوط آسفالتی باشد. اضافه کردن پارافایبر به آسفالت موجب بهبود عمر خستگی مخلوط می گردد و با افزودن پارافایبر به مخلوط حاوی ۵۰٪ خرده آسفالت می توان به مخلوط با عمر خستگی مطلوب دست پیدا کرد که دلیل آن را می توان افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی به واسطه افزودن پارافایبر دانست. در مخلوط های بدون خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عمر خستگی به طور متوسط ۱۱/۷٪ افزایش می یابد. در مخلوط های حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ خرده آسفالت، به ازای هر ۰/۰۶٪ افزودن پارافایبر، عمر خستگی به طور متوسط به ترتیب ۵/۶٪ و ۴/۴٪ افزایش می یابد. < با توجه به تأثیر مثبت خرده آسفالت در بهبود مقاومت

- pavement, *J. Clean. Prod.*, 192 (2018) 191–198.
- [18] M.A. Franesqui, J. Yepes, C. García-Gonzalez, J. Gallego, Sustainable low-temperature asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates and crumb rubber modified bitumen, *J. Clean. Prod.*, 207 (2019) 44–56.
- [19] K. Shabannezhad, M. Ameri, Laboratory evaluation of performance properties of warm mix recycled asphalt, Iran University of Science and Technology, 2012. (in Persian)
- [20] H. Behbahani, M.J. Ayazi, M.H. Shojaei, Laboratory Evaluation of Moisture Susceptibility and Rutting Potential of Warm Mix Asphalt, *J. Transp. Eng.*, Volume 7 (2016) 405–418. (in Persian)
- [21] A. Modares, M. Rahmanzadeh, Comparing the Effects of Coal Waste Filler and Pozzolanic Fillers on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, *J. Transp. Res.*, Volume 13 (2016) 86–103. (In Persian)
- [22] Technical Data Sheet Kaowax, (2017) www.kaochemicals-eu.com.
- [23] M.A. Esfahani, M.N. Jahromi, Optimum parafibre length according to mechanical properties in hot mix asphalt, *Road Mater. Pavement Des.* (2018).
- [24] M.F. Tafti, S.A.H. Aqda, H. Motamedi, The impacts of type and proportion of five different asphalt modifiers on the low-temperature fracture toughness and fracture energy of modified HMA, *Des. Civ. Environ. Eng.*, 47 (2019) 169–185.
- [25] ASTM D2172 Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures, 2017.
- [26] W. Zhao, F. Xiao, S.N. Amirkhani, B.J. Putman, Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 31 (2012) 265–272.
- [27] I.M. Asi, Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions, asphalt: an overview, *J. Clean. Prod.*, 24 (2012) 76–84.
- [9] M. Zaumanis, J. Jansen, V. Haritonovs, J. Smirnovs, Development of calculation tool for assessing the energy demand of Warm Mix Asphalt, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 48 (2012) 163–172.
- [10] S. Zhao, B. Huang, X. Shu, M. Woods, Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 92–100.
- [11] R. West, C. Rodezno, G. Julian, B. Prowell, B. Frank, L. V. Osborn, and T. Kriech, NCHRP Report 779: Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies, *Transp. Res. Board Natl. Acad. Washingt.*, (2014).
- [12] J. D'Angelo, E. Harm, J. Bartoszek, G. Baumgardner, M. Corrigan, J. Cowser, T. Harman, M. Jamshidi, W. Jones, D. Newcomb, B. Prowell, R. Sines, Y. Bruce, *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, (2008).
- [13] X. Yang, P.D. Lecturer, Z. You, D. Ph, P. E, M. Rosli, M. Hasan, P.D. Lecturer, A. Diab, P.D. Assistant, Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm, *J. Clean. Prod.*, 159 (2017) 346–358.
- [14] A. González, J. Norambuena-contreras, L. Storey, E. Schlangen, Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 164–174.
- [15] M. Mohajeri, *Hot Mix Asphalt Recycling, Practices and Principles*, Delft University of Technology, 2015.
- [16] M. Fakhri, S.A. Hosseini, Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion, *Constr. Build. Mater.* 134 (2017) 626–640.
- [17] W. Song, B. Huang, X. Shu, Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt

- [31] P.M.O. Owende, A.M. Hartman, S.M. Ward, M.D. Gilchrist, M.J. O'Mahony, minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure, *J. Transp. Eng.*, 127 (2001) 254–262.
- [32] A.R. Azarhoosh, F. Moghadas Nejad, Evaluating Fatigue Life of Asphalt Mixtures Using Surface Free Energy Parameters, *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 50 (2018). (in Persian)
- [33] BSI Standards Publication Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt Part 24: Resistance to fatigue, 2014.
- Constr. Build. Mater. 21 (2007) 1732–1740.
- [28] H. Ziari, H. Divandari, M. Hajiloo, A. Amini, Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures, *Constr. Build. Mater.* 217 (2019) 62–72.
- [29] M.W. Witczak, K. Kaloush, T. Pellinen, M. El-Basyouny, H. Von Quintus, NCHRP Reprot 465: Simple Performance Test for Superpave Mix Design, 2002.
- [30] H.R. Jahanian, G. Shafabakhsh, H. Divandari, Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite, *Constr. Build. Mater.* 131 (2017) 156–164.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Ziari, H. Divandari, M. Orouei, Performance Evaluation of WMA Made with Reclaimed Asphalt Pavement and Para-Fiber, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 977-994.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16736.6323](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16736.6323)

