فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۲، شماره ۳، بهار ۱٤۰۰، ٥٦۱-٥۸٥

مقاله پژوهشی

بررسی ویژگی های حجمی، استقامتی و خزشی بتن آسفالتی حاوی آسفالت بازیافتی و روغن موتور ضایعاتی

حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین بیات، مربی آموزشی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

فرید نوریان، دانش آموخته کارشناسی ارشد ، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰٤ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰

چکیده

این مطالعه به بررسی تأثیر استفاده از روغن موتور ضایعاتی بر روی برخی از خصوصیات بتن آسفالتی گرم حاوی درصدهای مختلفی از خرده آسفالت بازیافتی پرداخته است. روغن موتور ضایعاتی در درصدهای مختلف وزنی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ (نسبت به وزن قیر) به مخلوط بتن آسفالتی گرم، که در آن ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از سنگدانه‌ها با خرده آسفالت بازیافتی جایگزین شده است، افزوده شد. خصوصیات حجمی، استقامت، روانی و نسبت مارشال و خزش دینامیکی جهت بررسی شیارشدگی مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داد که افزودن خرده آسفالت بازیافتی درصد فضای خالی را افزایش می‌دهد، اما افزودن روغن ضایعاتی باعث کاهش درصد فضای خالی می‌شود. همچنین، با افزودن خرده آسفالت بازیافتی نسبت مارشال کاهش پیدا می‌کند و برای مخلوط‌های با ۷۵ و ۵۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی با افزودن روغن نسبت مارشال افزایش پیدا می‌کند. نتایج ازمایش خزش نشان داد که مخلوطهای حاوی خرده آسفالت دارای مقاومت به شیار شدگی بیشتری از مخلوط کنترل ساخته شده با مصالح بکر می باشد. همچنین، با افزایش روغن موتور ضایعاتی مقاومت به شیار شدگی کاهش می‌یابد. به علاوه، در مخلوط‌های آسفالتی با مقدار یکسان از خرده آسفالت بازیافتی، از نظر شیارشدگی، استفاده از ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی بهترین عملکرد را نسبت به سایر مقادیر روغن نشان داد. با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق و با هدف به کارگیری بیشترین مصالح ضایعاتی، می‌توان مخلوط حاوی ۷۵ درصد آسفالت بازیافتی و حدود ۱۳٪ درصد روغن موتور ضایعاتی را به عنوان مناسب‌ترین ترکیب در نظر گرفت.

واژه های کلیدی: خرده آسفالت بازیافتی، روغن موتور ضایعاتی، نسبت مارشال، خزش دینامیکی

۱. مقدمه

بتن آسفالتی گرم بیشترین مصالح مصرفی روسازی را در سراسر جهان دارد. در طول سال‌ها بعد از ساخت، روسازی آسفالتی خراب می‌شود و نیاز به برداشت از سطح جاده دارد. به تراشه‌های روسازی آسفالت قدیمی و خراب شده خرده آسفالت بازیافتی (RAP[1]) گفته می‌شود. اولین استفاده از آن به سال ۱۹۱۵ برمی‌گردد. اما، به دلیل بحران انرژی و افزایش هزینه قیر در سال ۱۹۷۰، استفاده از آن افزایش چشمگیری پیدا کرد [Sondag et al. 2002]. مصالح RAP به طور عمده شامل قیر و سنگدانه‌ها هستند. از این دو ماده، قیر به طور کلی دستخوش تغییرات فیزیکی و رئولوژیکی در طول عمر خدمت‌دهی‌اش می‌گردد. یکی از نتایج این تغییرات پیرشدگی قیر است و در طول پیرشدگی ویسکوزیته قیر به تدریج افزایش یافته و آن را به یک ماده سخت تبدیل می‌کند [Veeraragavan, 2016]. پیرشدگی قیر، اساسی‌ترین مشخصه مصالح RAP است که خواص و عملکرد مخلوط‌های بازیافت شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد [Izaks et al. 2015]. تحقیقات گسترده‌ای برروی استفاده از RAP، در تولید مخلوط آسفالتی گرم بازیافتی انجام شده است. مطابق با مطالعات، قیر پیرشده مانع اصلی برای ترکیب مقادیر بالای RAP درون روسازی آسفالتی است که موجب خرابی زودرس مثل شکست خستگی و ترک‌خوردگی دمای پایین در سازه روسازی می‌شود. یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل، افزودن عامل جوان‌کننده درون روسازی آسفالتی جدید حاوی خرده آسفالت بازیافتی برای بازگرداندن خواص قیر پیرشده شده به شرایط نزدیک به قیر بکر می باشد [DeDene and You, 2014]. در سال‌های اخیر یکی از مشکلات پیش رو قیمت بالای مواد افزودنی است. از این رو، به نظر می‌رسد استفاده از مواد ضایعاتی بر پایه روغن به ویژه روغن موتور ضایعاتی، گزینه مناسبی به عنوان عامل بازیابی باشد. در کشورهای مختلف میلیون‌ها وسیله نقلیه وجود دارد که باعث تولید روغن موتور ضایعاتی می‌شوند که اگر به خوبی دفع یا بازیافت نشوند، می‌توانند منجر به آلودگی زیست محیطی شود [Kamaruddin et al. 2014]. تخمین زده شده است که ٤٥ میلیون تن روغن موتور ضایعاتی (WEO[2]) هر ساله در جهان تولید می‌شود و تنها ٤٠ درصد این روغن به درستی جمع‌آوری و دفع می‌شود و حدود ۸ درصد آن بازیافت می‌شود [Maceiras, Alfonsín, and Morales, 2017]. از این رو، بازیافت و استفاده مجدد از این مصالح ضایعاتی گزینه مناسبی برای مقابله با این معضلات است. در همین راستا، مهندسان روسازی بر آن شدند که از روغن‌های ضایعاتی به عنوان مصالح ساخت مخلوط آسفالتی استفاده کنند.

با توجه به افزایش میزان بازیافت روسازی های آسفالتی و ضرورت استفاده از جوان کننده ها در بیشتر موارد، تقاضا برای مواد جوانساز افزایش یافته است. اغلب این مواد جوانساز نیز قیمت نسبتا بالایی داشته و استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جوانساز علاوه بر کمک به حفظ محیط زیست، اقتصادی نیز خواهد بود. روغن موتور ضایعاتی ممکن است مکملی برای جز نرم از دست رفته قیر پیرشده باشد و شبیه عامل جوان‌کننده عمل کند [Jia et al. 2015]. بنابراین، انتظار می‌رود استفاده از روغن موتور ضایعاتی به طور بالقوه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را بهبود بخشد.

شیارافتادگی عبارت است از فرورفتگی‌های طولی که در مسیر چرخ ها روی راه ایجاد می‌شوند. شیار افتادگی که ناشی از تراکم پیوسته در اثر تکرار بار ترافیکی ایجاد می‌شود، نوعی خرابی سازه‌ای در روسازی بتن آسفالتی است [Xiao, Amirkhanian, and Juang, 2007]. اما، مطابق با آنچه در بالا ذکر شد، استفاده از RAP زیاد در مخلوط آسفالتی، مخلوط آسفالتی سخت‌تر و تردتری

نسبت به مخلوط بدون RAP تولید می‌کند [Sabouri et al. 2015]. با توجه به اینکه، افزایش سختی مقاومت به شیارشدگی را بهبود می‌بخشد بنابراین، خرابی شیارشدگی نمی‌تواند مشکل جدی در این نوع مخلوط‌ها باشد. اما هنگام استفاده از روغن موتور ضایعاتی به دلیل نرم شدن مخلوط آسفالت بازیافتی، بررسی مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی مخلوط‌های حاوی مقادیر بالای RAP و روغن موتور ضایعاتی مهم به نظر می‌رسد.

با توجه به مطالعات گذشته برای مخلوط‌های آسفالتی با درصد RAP زیاد همراه با جوان‌کننده مطالعات اندکی صورت گرفته است و هنوز مطالعات کامل و جامعی برروی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر بالای RAP و روغن موتور ضایعاتی انجام نشده است. در این تحقیق از درصدهای مختلف روغن موتور ضایعاتی به طور مستقیم در مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالت بازیافتی با درصدهای بالا استفاده شده است. هدف از این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی برروی ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای بالای خرده آسفالت بازیافتی با افزودن روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. برای این منظور، قیر بکر PG58-16 و مصالح خرده آسفالت بازیافتی با مقادیر ۲۵ و ۵۰ و ۷۵ درصد وزن سنگدانه و روغن ضایعاتی موتور (بدست آمده از تعمیرگاه) با چهار درصد مختلف (۰٪، ۵٪، ۱۰٪و ۱۵٪) بر اساس وزن کل قیر استفاده شدند و با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی استقامت و روانی مارشال و خزش دینامیکی مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، مناسب‌ترین ترکیب جوان‌کننده و RAP بدست آید.

۲. پیشینه تحقیق

طی سال‌های گذشته محققان از انواع مختلف جوان‌کننده‌های بر پایه روغن برای جوانسازی قیر پیرشده و مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP استفاده کرده‌اند. از جمله این جوان‌کننده‌ها می‌توان به روغن سیلندر [Borhan et al. 2007] روغن موتور ضایعاتی [DeDene and You, 2014; Dokandari et al. 2017; Jia et al. 2015; Zaumanis et al. 2014]، روغن خوراکی ضایعاتی [Dokandari et al. 2017; Zaumanis et al. 2014]، گریس گیاهی ضایعاتی، روغن آلی، عصاره آروماتیک، Distilled Tall Oil [Zaumanis et al. 2014]، روغن روانکاری [Zamhari, Hermadi, and Fun, 2009]، Naphthenic Oil، Paraffinic Oil، Aromatic Extracts، Tall Oil و Oleic Acid [Ali et al. 2016] اشاره نمود.

محققان گزارش کردند که افزودن عوامل جوان‌کننده دماهای اختلاط و تراکم را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [Romera et al. 2006]. علاوه بر این، گزارش شده روغن توانایی لازم برای کاهش ویسکوزیته و نرمی قیر را دارد [Borhan et al. 2007]. در همین راستا Zamhari و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که افزودن ۱۰ درصد ULO^3 به قیر پیرشده مصنوعی با درجه نفوذ ۳۱dmm برای رسیدن به درجه نفوذ هدف ۸۰/۱۰۰ کمک می‌کند [Zamhari, Hermadi, and Fun, 2009]. باید توجه داشت که نوع جوان‌کننده اثر قابل توجهی برروی درجه‌های عملکردی واقعی دمای بالا و پایین دارد [Ali et al. 2016] و عملکرد آن‌ها به درجه اختلاط بین قیر مصالح بازیافتی و قیر بکر، سنگدانه‌ها و مقدار مصرف جوان‌کننده بستگی دارد [Im et al. 2014]. همچنین، استفاده از جوانسازها منجر به کاهش درصد فضای خالی در مخلوط می شود که به اثر پخش جوانساز در قیر سخت نسبت داده می‌شود [Mogawer et al. 2013].

چن و همکاران ۲۰۱٤ گزارش کردند که افزودن جوانساز مقاومت به شیارشدگی مخلوط‌های حاوی RAP را کاهش می‌دهد [Chen et al. 2014]. همچنین، گزارش شد مخلوط‌های ساخته شده با جوان‌کننده‌ها در مقایسه با مخلوط‌های ساخته شده با قیر نرم‌تر

مقاومت بالاو عمق شیارشدگی پایینی دارند [Shen, Amirkhanian and Aune Miller, 2007].

ددن[4] و یو (۲۰۱٤) عملکرد قیرها و مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی جوان شده با WEO را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه قیر بکر با قیر ضایعاتی (RAB[5]) بدست آمده از RAP و WEO مخلوط شد. برای اختلاط قیر جدید و RAB، مقادیر ۷۵ و ۲۵ درصد RAP را به ترتیب انتخاب کردند. برای ساخت مخلوط آسفالتی نیز از ۰ و ٤ و ۸ درصد وزن کل قیر WEO و ۲٤ درصد RAP استفاده کردند. نشان دادند که روغن موتور ضایعاتی توانایی بازگرداندن خواص شیمایی قیر پیر شده را دارد. همچنین، نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مخلوط نشان دادند که افزودن RAP مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت به شیارشدگی نمونه‌ها را افزایش نمی‌دهد. با افزایش مقدار WEO به نمونه‌ها، افزایش در شیارشدگی و کاهش در مقاومت کششی غیرمستقیم مشاهده شد [DeDene and You, 2014].

زائومانیس و همکاران در سال ۲۰۱٤ مطالعه‌های مختلفی روی ٦ جوانساز مختلف شامل ٤ جوانساز ارگانیک و ۲ جوانساز نفتی از جمله روغن موتور ضایعاتی انجام دادند. در این مطالعه همه جوانسازها با مقدار ۱۲ درصد وزن قیر استفاده شدند و خواص قیر و مخلوط جوان شده حاوی ۱۰۰ درصد مصالح بازیافتی با انجام آزمایش‌های مختلف روی قیر و مخلوط مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که روغن موتور ضایعاتی در مقایسه با سایر جوانسازها به مقدار بیشتری برای کاهش درجه عملکردی قیر از PG94-12 به PG64-22 نیاز دارد. کارایی مخلوط‌های جوان شده بهبود یافت و علاوه بر این، همه محصولات مقاومت به شیارشدگی بالاو عمر خستگی طولانی را در مقایسه با مخلوط‌های بکر نشان دادند و دمای بحرانی ترک‌خوردگی پایین‌تری داشتند در نهایت مطابق با نتایج، روغن موتور ضایعاتی پایین‌ترین نمره را از لحاظ بهبود خواص گرفت. همچنین به این نتیجه رسیدند که آزمایش درجه نفوذ می‌تواند شاخص خوبی برای انتخاب اولیه مقدار بهینه جوانساز باشد [Zaumanis, Mallick, and Frank, 2014, 2015; Zaumanis et al. 2014].

ژیا[6] و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه آزمایشگاهی بر روی تأثیر روغن موتور ضایعاتی در عملکرد مخلوط آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت بازیافتی انجام دادند. مخلوط‌های آزمایشگاهی HMA حاوی سه مقدار RAP (۰ و ۲۵ و ٤۰ درصد) و سه مقدار روغن موتور ضایعاتی (۰ و ۲ و ۵ درصد) بودند و نتایج نشان داد که اختلاط روغن موتور ضایعاتی با HMA حاوی RAP ممکن است افزایش سختی بدلیل حضور قیر پیرشدهٔ RAP را جبران نماید. مضاف بر این، در این تحقیق مشاهده شد که با افزودن روغن موتور ضایعاتی مقدار قیر بهینه و مقاومت به شیارشدگی کاهش می‌یابد [Jia et al. 2015].

آقازاده دکانداری و همکاران (۲۰۱۷) اثر روغن موتور و خوراکی ضایعاتی را بروی جوانسازی قیرهای پیرشده و مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی بررسی کردند. در این پژوهش، مقدار بهینه جوانساز با افزودن آن به قیر پیرشده در درصدهای مختلف و با هدف رسیدن درجه نفوذ قیر پیرشده به درجه نفوذ قیر جدید تعیین شد. مقدار بهینه برای WEO و WCO به ترتیب ۵/٤ درصد و ۵/۱ درصد وزن قیر پیرشده بدست آمد. سپس مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با مقادیر بهینه جوانساز بدست آمده و درصدهای مختلف RAP (۰ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ٤۰ و ۵۰ و ٦۰ و ۷۰ و ۸۰ درصد) ساخته شدند. در نهایت، آزمایش‌های تحلیل حجمی، استقامت و روانی مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم انجام شدند. نتایج نشان دادند که مقدار درجه نفوذ با افزایش مقدار جوانساز افزایش می‌یابد. استفاده از WEO و WCO به عنوان جوانساز برای مخلوط‌های حاوی RAP مقدار RAP استفاده شده در مخلوط را افزایش می‌دهد. با

تکنولوژی‌های بازیافت تا ۷۰-۸۰ درصد RAP می‌تواند بدون اثرات نامطلوب در لایه رویه استفاده شود. فرآیند اختلاط و تراکم برای مخلوط‌های جوان‌شده راحت‌تر انجام می‌شود. شاخص‌های پیری مخلوط‌های جوان‌شده در مقایسه با مخلوط‌های جوان‌نشده بهبود می‌یابد [Dokandari et al. 2017].

۳. مواد و مصالح

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل قیر، سنگدانه جدید، خرده آسفالت بازیافتی و روغن موتور ضایعاتی بودند. در این پژوهش به دلیل استفاده از درصد RAP بالا و به منظور حذف تأثیر قیرهای با درجه نفوذ مختلف، برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم، قیر بکر PG58-16 استفاده شد. این قیر از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه گردید. جدول ۱ مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد که توسط شرکت ارائه گردیده‌اند.

مصالح سنگی بکر مورد استفاده در ساخت مخلوط آسفالتی بازیافتی از جنس آهک دولومیتی و از شرکت نگین گستران راه زندیگان در شهر زنجان تهیه شد. همچنین در این مطالعه از فیلر پودر سنگ آهک برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم بازیافتی استفاده شده است. مشخصات فنی مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است و ملاحظه می‌شود که جوابگوی الزامات نشریه ۲۳٤ است. همچنین، خصوصیات حجمی و درصد جذب آب مصالح سنگی در جدول ۳ ارائه گردیده‌اند. این نتایج از کارخانه آسفالت تولید کننده این مصالح سنگی گرفته شده است.

مصالح خرده آسفالت استفاده شده در این تحقیق از انبار دپوی مصالح خرده آسفالت واقع در راهداری زنجانرود تهیه شد. ابتدا مصالح خرده آسفالتی، دانه‌بندی شدند که دانه‌بندی آن در شکل ۱ آمده است. سپس درصد قیر مصالح RAP با استفاده از روش تجزیه آسفالت به وسیله سانتریفوژ مطابق با استاندارد ASTM-D2172 بدست آمد. در این آزمایش از بنزین به عنوان حلال استفاده شد. پس از جداسازی قیر از مصالح سنگی، درصد قیر RAP و دانه‌بندی مصالح سنگی RAP (مصالح بازیابی شده) و همچنین درصد شکستگی مصالح سنگی تعیین شدند که نتایج آن در جدول ٤ و شکل ۱ ارائه شده است. با توجه با شکل ۱ ملاحظه می‌شود که دانه‌بندی مصالح RAP قبل و بعد از جداسازی تقریباً در محدوده دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه روسازی ۲۳٤ قرار دارد. بنابراین، از دانه‌بندی شماره ٤ به عنوان دانه-بندی پایه برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی استفاده شد تا برای درصدهای مختلف RAP در مخلوط آسفالتی تغییری در دانه-بندی وجود نداشته باشد و برای تمامی مخلوط‌ها از دانه‌بندی یکسان استفاده شد. شکل ۲ محدوده دانه‌بندی و دانه‌بندی مورد استفاده برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را نشان می‌دهد.

از روغن موتور ضایعاتی به عنوان جوان‌کننده برای مخلوط‌های آسفالتی گرم بازیافتی استفاده شد. روغن موتور ضایعاتی از تعمیرگاهی در شهر زنجان تهیه شد. برای خارج کردن مواد زائد موجود در روغن‌های ضایعاتی، قبل از استفاده روغن‌های ضایعاتی از صافی گذرانده شدند. در شکل ۳ روغن ضایعاتی استفاده شده در این تحقیق نمایش داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات قیر مورد استفاده در تحقیق

عنوان آزمایشات	استاندارد	نتایج	محدوده
درجه عملکردی (PG)	-	۵۸-۱٦	-
میانگین هفت روز متوالی بیشترین دمای روسازی (°C)	-	۵۸	-

	حداقل دمای روسازی ($^{\circ}C$)	-	-۱۶		-
	درجه اشتعال ($^{\circ}C$)	ASTM-D92	+۳۰۰		>۲۳۰
	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۰/۱ میلی‌متر)	ASTM-D5	۸۹-۸۸		۸۵-۱۰۰
	ویسکوزیته در دمای ($^{\circ}C$)۱۳۵ (Pa.S)	ASTM-D4402	۰/۲۹۴۵		حداکثر ۳
DSR	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)		۵۸	٦٤	-
DSR	$G^*/Sin\delta$ (قیر اصلی) (KPa)	AASHTO T315	۱/٤۵	۰/٦٤	حداقل ۱
DSR	$G^*/Sin\delta$ (قیر پیرشده RTFOT) (KPa)	AASHTO T315	۳/۳۳	۱/٤۳	حداقل ۲/۲
DSR	دمای PAV ($^{\circ}C$)		۱۹	۲۲	-
DSR	$G^*.Sin\delta$ (Kpa)	AASHTO T313	٥٤۱۰	٤۲٤۰	حداکثر ٥۰۰۰
BBR	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)		-٦	-۱۲	-
BBR	سختی خزش (S) (MPa)	-	۷۰/۳٤۷	۱۹٤/٤٥٤۹	حداکثر ۳۰۰
BBR	m-value	-	۰/۳۹۳۳	۰/۲۳	حداقل ۰/۳

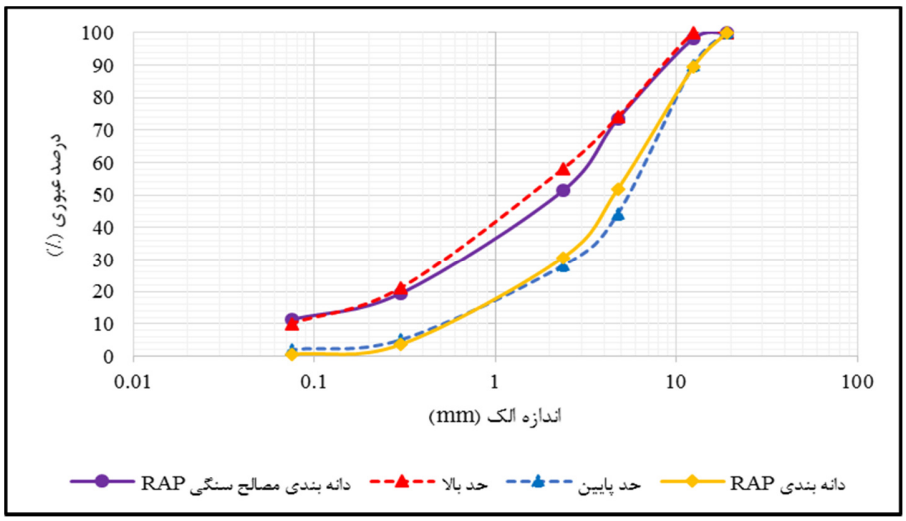
جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی بکر

مشخصه	روش آزمایش	نتایج آزمایش			حدود آیین‌نامه	
		درشت دانه	ریزدانه	فیلر	درشت دانه	ریزدانه
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176	-	۷۸	-	حداقل ۵۰	–
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس	AASHTO-T96	۲۷	-	-	حداکثر ۲۵	–
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ٤ در یک جبهه	ASTM-D5821	۱۰۰	-	-	حداقل ۹۵	–
در دو جبهه		۹۸			حداقل ۹۰	–
درصد اندود قیر به مصالح سنگی	ASTM-D1664	بیش از ۹۵ درصد		-	–	–

درصد فضای خالی رد شده از الک نمره ۸ (FAA[7])	ASTM-D1252	-	٤٥/٩	-	-	-	حداقل ٤٥
درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO_2)	-	٢٠		-	-	-	-
ضریب نرمی ماسه	AASHTO-M6	-	٣	-	-		
درصد تورق	BS-812	٢٠	-	-	حداکثر ٢٥	-	
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	AASHTO-T104	١/٣	٠/٧	-	حداکثر ٨	حداکثر ١٢	

جدول ٣. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی بکر

مشخصه	وزن مخصوص (g/cm^3)		جذب آب (٪)
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ٨	٢/٧١	٢/٦٥	٠/٨
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ٨ و مانده روی الک شماره ٢٠٠	٢/٧٣	٢/٦٥	١/٢
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ٢٠٠		٢/٨٦	-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی G_{sb} (g/cm^3)		٢/٦٦٠	

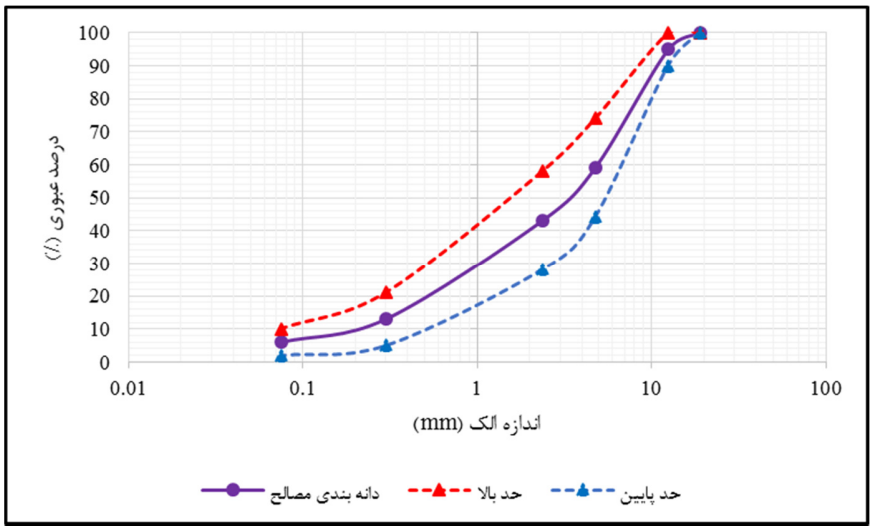


شکل ١. دانه‌بندی مصالح خرده آسفالت بازیافتی

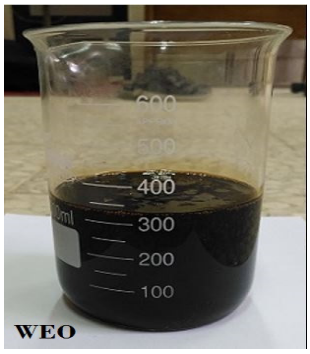
جدول ٤. مشخصات مصالح RAP

آزمایش	استاندارد مورد استفاده	نتایج آزمایش	محدوده

درصد قیر موجود در RAP	ASTM-D2172	٪ ۵/۰۸	–
درصد شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه	ASTM-D5821	٪ ۹۱	حداقل ۹۰ درصد



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی بکر



شکل ۳. روغن موتور ضایعاتی استفاده شده

٤. طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق ۱۳ نوع مخلوط مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. یک مخلوط که فاقد هیچگونه مواد ضایعاتی است و از قیر بکر و مصالح سنگی بکر معدنی استفاده شده است به عنوان مخلوط کنترل در نظر گرفته شد. در ۳ مخلوط دیگر از ۲۵ و ۵۰ و ۷۵ درصد (بر حسب وزن سنگدانه) مصالح آسفالت بازیافتی استفاده گردیده است، اما ماده جوان کننده ضایعاتی در آن به کار برده نشده است. در ۹ نوع مخلوط دیگر نیز درصدهای مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵٪ (بر حسب وزن قیر) روغن موتور ضایعاتی در مخلوطی که دارای ۲۵ و ۵۰ و ۷۵ درصد آسفالت

بازیافتی است استفاده گردیده است. طراحی مخلوط کنترل و نمونه-های مخلوط آسفالتی بازیافتی در شرایط آزمایشگاهی به روش مارشال و مطابق با استاندارد ASTM-D1559 برای تعیین قیر بهینه انجام شد و معیارهای انتخاب مصالح مورد استفاده بر طبق آیین‌نامه روسازی آسفالتی (نشریه ۲۳٤) تعیین گردید. مقدار قیر بهینه برای مخلوط کنترل (بدون RAP و جوانساز) ٤/٥ درصد تعیین شد. با توجه به نتایج ژیا و همکاران (۲۰۱۵) مقدار قیر بهینه با افزودن روغن کاهش می‌یابد. بنابراین با ارزیابی خواص حجمی مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن ضایعاتی مقدار قیر بهینه مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف RAP و روغن موتور ضایعاتی تعیین شدند. برای مخلوط کنترل، سنگدانه‌های جدید به مدت ١٦ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه به منظور خشک شدن مصالح و رسیدن به دمای مورد نظر در گرم‌خانه قرار گرفتند و قیر تا دمای ۱۵۰ درجه گرم شد؛ در ادامه مقدار مورد نظر قیر جدید به سنگدانه‌های جدید اضافه شده و اختلاط انجام گرفت. برای مخلوط‌های بازیافتی، از روشی که در تحقیقات قبلی به کار رفته (Veeragavan, 2016) استفاده گردید. مصالح RAP به مدت ۱/٥ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه حرارت داده شدند و در مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن ضایعاتی، هنگام اختلاط ابتدا به مصالح RAP افزوده شدند و پس از اختلاط کامل با مصالح RAP، مصالح سنگی جدید و قیر گرم شده افزوده شده و تا اختلاط کامل و پوشش مصالح سنگی با قیر مخلوط شدند. در نهایت مخلوط‌ها درون قالب مارشال ریخته شده و برای انجام تراکم زیر چکش مارشال قرار گرفتند. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال اتوماتیک با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. سپس، نمونه‌ها بعد از ٢٤ ساعت از قالب خارج شده و بر روی آنها آزمایش‌های مورد نظر انجام گرفت.

۵. شرح آزمایش‌های انجام شده

برای بررسی تأثیر روغن موتور ضایعاتی بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر بالای RAP، از آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال و خزش دینامیکی (جهت بررسی مقاومت به شیارشدگی) استفاده شد. برای ارزیابی مقاومت به شیارشدگی آزمایش خزش دینامیکی تحت تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. در طی این مطالعه، خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی نیز بررسی گردید. در این تحقیق، سه نمونه برای هر آزمایش ساخته شد و میانگین نتایج بدست آمده مقایسه و بحث گردید.

۵-۱ خصوصیات حجمی

وزن مخصوص مخلوط‌های متراکم شده مطابق با روش استاندارد ASTM-D2726 اندازه‌گیری شدند. همچنین، وزن مخصوص حداکثر تئوری مخلوط‌ها مطابق با روش استاندارد ASTM-D2041 اندازه‌گیری شدند. با استفاده از وزن مخصوص واقعی (G_{mb}) و حداکثر نظری (G_{mm})، مقدار فضای خالی مخلوط‌ها (V_a)، درصد فضای خالی سنگدانه‌ها (VMA) و درصد فضای خالی پرشده با قیر (VFA) با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ تعیین شدند:

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100 \quad (۱)$$

$$VMA = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} P_s\right) \times 100 \quad (۲)$$

$$VFA = \left(1 - \frac{V_a}{VMA}\right) \times 100 \quad (۳)$$

که در آن P_s درصد سنگدانه در مخلوط (براساس وزن کل مخلوط) است و G_{sb} چگالی واقعی مصالح سنگی می باشد.

۵-۲ آزمایش مارشال

آزمایش استقامت و روانی مارشال به منظور تعیین خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی انجام شد. این آزمایش طبق روش استاندارد ASTM D 1559 انجام گرفت ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای شکل به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با درجه حرارت ۱±۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها از آب خارج و بین فک‌های دستگاه آزمایش مارشال که قابلیت حرکت با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه را داشت، قرار داده شدند و تا لحظه گسیختگی تحت فشار واقع شدند. در نهایت، بیشترین نیروی لازم برای گسیخته شدن نمونه (استقامت مارشال) و تغییر شکل قطری (روانی) اندازه-گیری شدند.

علاوه بر این، نسبت مارشال (MQ) (نسبت استقامت (kN) به روانی مارشال (mm)) نیز روی نمونه‌های مختلف محاسبه گردید که می‌تواند جهت توصیف مقاومت به تغییرشکل‌های دائم مخلوط‌های آسفالتی استفاده شود. هرچه این نسبت بیشتر باشد، مخلوط مقاومت بهتری به تنش‌های برشی و تغییرشکل دائمی دارد [Ameri, Hesami, and Goli, 2013].

۵-۳ آزمایش خزش دینامیکی

در این مطالعه، آزمایش خزش دینامیکی، به دلیل همبستگی خوب آن با مقاومت به شیار شدگی مخلوطهای آسفالتی [Khodaii and Mehrara, 2009]، با استفاده از دستگاه UTM-10 مطابق با روش استاندارد EN 12697-25 (2005) انجام شد. جدول ۵ شرایط آزمایش را نشان می‌دهد. تنش مورد استفاده بر اساس مقادیر به کار رفته در تحقیقات قبلی (Taherkhani and Arshadi, 2017) انتخاب گردید. نمونه های مورد نیاز برای آزمایش با استفاده از تراکم مارشال ساخته شدند، که در آن نمونه های با قطر ۱۰ و ارتفاع حدود ۶/۲۵ سانتیمتر با اعمال ۷۵ ضربه ساخته شدند. برای انجام آزمایش، نمونه قبل از بارگذاری، درون محفظه کنترل کننده دما به مدت ۲ ساعت قرار داده شد تا به دمای مورد نظر برسد. با توجه به اینکه تغییرشکل دائمی در مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالاتر رخ می‌دهد از این رو، آزمایش‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شدند و تا اتمام آزمایش دما ثابت نگه داشته شد. این دما در تحقیقات قبلی نیز به کار رفته است (Taherkhani, Afroozi and Javanmard, 2017) قبل از شروع آزمایش خزش دینامیکی، یک بار استاتیکی به اندازه ۱۰ درصد تنش دینامیکی در به مدت ۱۰ دقیقه نظر گرفته شد. فرآیند پیش بارگذاری قبل از خزش دینامیکی تضمین می‌کند که سطوح نمونه و صفحات بارگذاری به طور کامل در تماس با یکدیگر قرار گرفته‌اند و قسمت‌های آزاد در سطوح نمونه، حرکات تغییر شکلی خود را انجام داده‌اند. سپس بارگذاری دینامیکی تا رسیدن به ۱۰۰۰۰ تعداد بار یا تغییر شکل به میزان ٤ درصد ارتفاع نمونه (هر کدام زودتر اتفاق بیفتد) اعمال شد. داده‌های خروجی (تعداد تکرار بار در برابر تغییرشکل دائمی) با استفاده از نرم‌افزار موجود در کامپیوتر و متصل به دستگاه UTM جمع‌آوری و ثبت شدند.

٦. نتایج و بحث

٦-۱ خصوصیات حجمی

پارامترهای حجمی مخلوط‌های آسفالتی متفاوت با درصدهای مختلف RAP (۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد برحسب وزن کل سنگدانه) و روغن موتور ضایعاتی با مقادیر (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد برحسب وزن قیر) و مخلوط کنترل بدون RAP و روغن ضایعاتی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر نتایج حجمی شامل، درصد هوا (V_a)، فضای خالی درون سنگدانه (VMA) و فضای خالی پر شده با قیر (VFA) در جدول ٦ ارائه شده است. در این جدول مخلوط کنترل با نام Control، مخلوط حاوی خرده آسفالت بازیافتی با R، مخلوط‌های حاوی روغن ضایعاتی موتور با E نشان داده شده‌اند. همچنین مقدار

درصد RAP و روغن ضایعاتی به صورت عدد بعد از حروف به کار رفته‌اند. به عنوان مثال، مخلوط با ۲۵ درصد RAP و ۵ درصد روغن موتور ضایعاتی به صورت R25-E5 نامگذاری شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط‌های بازیافتی بدون روغن ضایعاتی دارای مقدار قیر بهینه بزرگتری از مخلوط کنترل هستند، که به دلیل افزایش درصد فضای خالی آن در هنگامی است که قیر بهینه مخلوط کنترل برای آن استفاده می‌شود. افزایش درصد فضای خالی نشان می‌دهد که قیرهای سخت شده RAP به طور کامل با قیر جدید ترکیب نمی‌شوند و منجر به ایجاد مخلوط با مقدار قیر موثر کل کم و در نتیجه کاهش کارایی مخلوط می‌شود [Zhang, 2010]. به همین منظور درصد قیر افزایش یافت تا جوابگوی حدکثر درصد فضای مجاز باشد. این نتایج مشابه با نتایج مطالعه موگاور و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشند، که نتیجه گرفتند با افزایش خرده آسفالت ضایعاتی درصد فضای خالی مخلوط کنترل ۰/۸ تا ۱/۲ درصد افزایش می‌یابد [Mogawer et al. 2013].

در شرایطی که از روغن ضایعاتی در مخلوط استفاده می‌شود درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد. همچنین، ملاحظه می‌گردد که با درصد قیر بهینه مساوی با مخلوط کنترل، درصد فضای خالی مخلوط‌های حاوی روغن با افزایش درصد روغن کاهش می‌یابد. مطالعه ژیا و همکاران (۲۰۱۵) نیز که از ۲ و ۵ درصد روغن موتور ضایعاتی در مخلوط‌های حاوی ۲۵ و ٤٠ درصد RAP استفاده کردند نتایج مشابهی را نشان داد. کاهش درصد قیر بهینه به دلیل نفوذ روغن به درون قیر پیرشده و در نتیجه افزایش مشارکت مقدار قیر پیرشده RAP در مخلوط و افزایش مقدار قیر موثر کل است و بنابراین، باعث افزایش کارایی مخلوط و راحتی تراکم آن می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود که، با مقدار یکسان جوان کننده، مقدار VMA مخلوط‌ها با افزایش RAP افزایش می یابد، و، در مقدار یکسان RAP، با افزایش روغن VMA کاهش می‌یابد، که مشابه با یافته‌های ژیا و همکاران (۲۰۱۵) می باشد. از آنجا که میزان تراکم برای هر مخلوط ثابت در نظر گرفته شده است، تغییرات VMA به تغییرات در ویسکوزیته قیر و همچنین نرم شدن قیر به سبب افزودن روغن و اثرات ترکیبی قیر پیر شده و روغن نسبت داده می‌شوند. علاوه بر این، کاهش VMA می‌تواند به دلیل افزایش مشارکت قیر RAP در مخلوط در اثر افزودن روغن باشد.

با این حال، تمامی مقادیر VMA در محدوده مشخصات فنی آیین‌نامه هستند. این مشاهدات نشان می‌دهند که روغن ضایعاتی به عنوان عامل کاهش‌دهنده ویسکوزیته عمل می‌کند و علاوه بر این کاهش ویسکوزیته باعث بهبود کارایی مخلوط آسفالتی می‌شود [Ji et al. 2016]. مقادیر VFA نیز با افزودن RAP افزایش می‌یابند و همچنین با افزودن روغن نیز تقریباً روند افزایشی دارند.

جدول ۵. شرایط آزمایش خزش

تنش (kPa)	فرکانس (Hz)	شکل بارگذاری	زمان بارگذاری(s)	زمان استراحت(s)	تعداد بار اعمالی	دمای آزمایش(°C)	قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)
۳۰۰	۱	مربعی	۰/۵±۰/۰۵	۰/۵±۰/۰۵	۱۰۰۰۰	۵۰	۱۰۱	٦٤±۲

جدول ٦. نتایج مشخصات حجمی مخلوط‌های بازیافتی

نام مخلوط	درصد قیر بهینه (٪)	درصد فضای خالی مخلوط (٪)	درصد فضای خالی مصالح سنگی (٪)	درصد فضای خالی پر شده با قیر (٪)
Control	٤/٥	٤/٥٧	١٣/٤٦	٦٦/٠٢
R25-0	٤/٦	٣/٨	١٣/٦٦	٧٢/٤٧
R25-E5	٤/٥	٣/٦٨	١٣/٦٣	٧٣/٠٠
R25-E10	٤/٥	٣/٤٤	١٣/٤١	٧٤/٣٥
R25-E15	٤/٥	٣/٦٧	١٣/٢٧	٧٢/٣٧
R50-0	٤/٧	٤/٥	١٤/٥٥	٦٩/٠٨
R50-E5	٤/٥	٤/٣٢	١٤/٢٥	٦٩/٦٩
R50-E10	٤/٥	٣/٧٢	١٣/٧١	٧٢/٨٨
R50-E15	٤/٤	٣/٦٥	١٣/٥١	٧٢/٩٧
R75-0	٤/٨٥	٤/١٣	١٥/١٥	٧٤/٠٦
R75-E5	٤/٥	٤/٤٩	١٤/٧٩	٦٩/٤٥
R75-E10	٤/٥	٣/٧	١٤/٠٩	٧٣/٧٢
R75-E15	٤/٥	٣/٢	١٤/٠١	٧٧/١٦

٦-٢- آزمایش استقامت و روانی مارشال

شکل ٤ نتایج استقامت مارشال تمامی مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل حداقل استقامت مارشال مورد نیاز مطابق با مشخصات فنی نیز با خط‌چین نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می گردد، مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی و بدون روغن دارای استقامت مارشال بالاتری از مخلوط کنترل هستند، و با افزایش درصد RAP میزان استقامت افزایش می‌یابد، که دلیل آن سختی بیشتر قیر موجود در مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی است. این نتایج هماهنگ با نتایج تحقیقات پیشین می باشد [Dokandari et al. 2017; Izaks et al. 2015]. همچنین، ملاحظه می‌گردد که مخلوط‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی و ۵۰ و ۷۵ درصد RAP دارای استقامت مارشال بیشتری از مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد RAP بدون روغن هستند. دلیل این موضوع به نظر می‌رسد به سبب کاهش درصد فضای خالی در این مخلوط‌ها در اثر افزایش در کارآیی مخلوط و افزایش چسبندگی در قیر پیر شده آسفالت بازیافتی با به کارگیری روغن باشد. اما، در مخلوط‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد RAP و ۱۵ درصد روغن موتور ضایعاتی، به دلیل نرم شدن بیشتر و کاهش چسبندگی در قیر، استقامت کاهش یافته است، که مشابه با نتایج مطالعه یعقوبی و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشند، که از HVS[۹] به عنوان جوانساز برای مخلوط‌های حاوی RAP استفاده کردند [Yaghoubi et al. 2013]. با وجود کاهش استقامت مخلوط‌های حاوی ۱۵ درصد

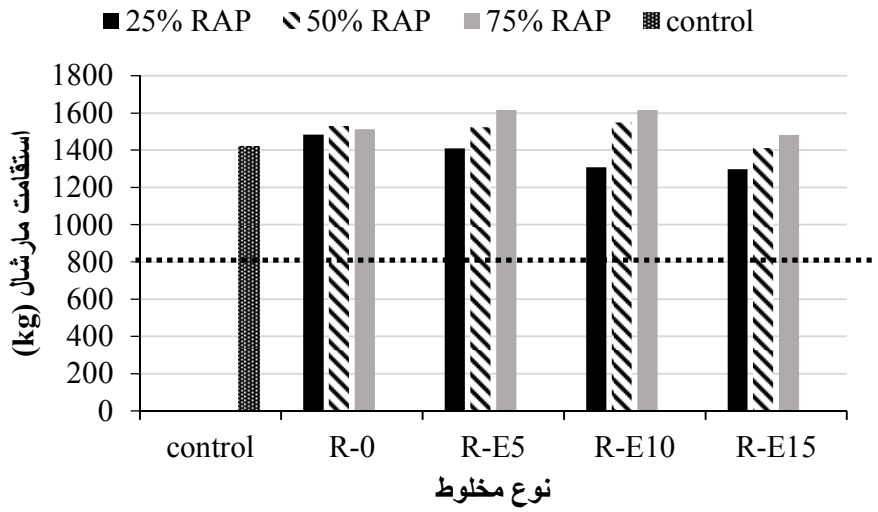
روغن، اما هنوز استقامت آن برابر یا کمی بیشتر از مخلوط کنترل است. همچنین، مشاهده می‌شود که برای مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد RAP و ۵ درصد روغن ضایعاتی موتور استقامت مارشال تقریباً برابر با مخلوط کنترل است و با افزایش مقدار روغن، استقامت کاهش می‌یابد، که دلیل این موضوع را نیز می‌توان افزایش نرمی قیر با افزودن روغن ضایعاتی بیان نمود. بنابراین، اگر هدف استفاده از درصدهای پایین RAP باشد، باید از مقادیر پایین‌تر روغن ضایعاتی (۵ درصد) استفاده شود. همچنین، بر اساس این نتایج، اگر هدف به کارگیری درصد آسفالت بازیافتی زیاد در مخلوط، بدون افزایش زیاد در استقامت و سختی باشد می‌توان پیشنهاد داد که ۱۵ درصد روغن موتور ضایعاتی در مخلوط استفاده گردد، در نهایت، مشاهده می‌شود همه مخلوط‌ها استقامت مارشال بالاتری از حداقل مقدار تعیین شده توسط آیین‌نامه ۲۳٤ که ۸۰۰ کیلوگرم است، دارند.

شکل ۵ نتایج مربوط به روانی مخلوط‌ها و همچنین محدوده مجاز آیین‌نامه را به صورت خطوط خط‌چین نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، بر خلاف انتظار مقدار روانی مخلوط‌های حاوی آسفالت بازیافتی دارای مقادیر بیشتری از مخلوط کنترل هستند که با افزایش مقدار RAP روانی افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته های تحقیقات قبلی [Izaks et al. 2015] همخوانی دارد، اما بر خلاف نتایج [Dokandari et al. 2017] هستند. دلیل تفاوت نتایج ما با یافته‌های آقازاده دکانداری و همکاران این است که در مطالعه انجام شده توسط ایشان مقدار قیر بهینه برای تمامی مخلوط‌ها ثابت در نظر گرفته شده است در حالی که در این تحقیق مقدار فضای خالی ثابت در نظر گرفته شده است و افزایش فضای خالی به سبب حضور RAP با افزودن قیر جبران شده است. بنابراین، افزایش قیر در مخلوط‌های حاوی RAP باعث افزایش نرمی مخلوط و در نتیجه افزایش مقدار روانی مارشال می‌شود. علاوه بر این، دلیل افزایش روانی مخلوط‌های حاوی RAP با مخلوط کنترل تفاوت در ساختار این دو نوع مخلوط می باشد. مخلوط‌های حاوی آسفالت بازیافتی دارای ریزدانه‌های بیشتری بودند چون که در خرده آسفالت بازیافتی قیرهای پیرشده به ذرات ریز و درشت سنگدانه چسبیده و باعث ایجاد RAP درشت‌دانه شده بودند که با حرارت در آون این ذرات از هم جدا شده و مخلوط ریزدانه‌تری به وجود آوردند که باعث نرم‌تر شدن مخلوط‌ها گردیده است. همچنین، تجربه آزمایشگاهی نشان داد که عمل اختلاط قیر با مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی زیاد به سختی انجام می‌گرفت و حتی برخی از سنگدانه به خوبی اندود نمی‌شدند و برای اندود همه سنگدانه‌ها باید زمان اختلاط افزایش می‌یافت که باعث کاهش دمای مخلوط می‌گردید. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با افزایش روغن ضایعاتی مقدار روانی به طور جزیی کاهش می‌یابد، اما تفاوت زیاد نیست. اگرچه استفاده از روغن باعث نرم‌تر شدن مخلوط می‌گردد و انتظار می‌رود که روانی افزایش یابد، کاهش روانی را می‌توان به بهبود قابلیت اندود سنگدانه‌های بازیافتی در هنگام اختلاط توسط روغن و کاهش فضای خالی با افزودن روغن ارتباط داد. اندود بیشتر سنگدانه‌ها توسط قیر چسبندگی را بهبود داده و روانی را کاهش می‌دهد. با این حال، مقدار روانی همه مخلوط‌ها در محدوده قابل قبول بر اساس مشخصات فنی می‌باشد.

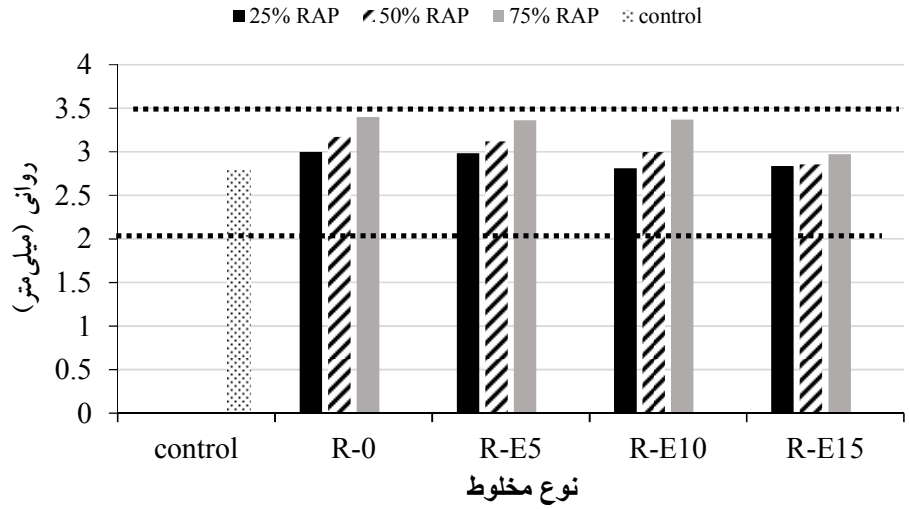
نسبت مارشال معمولاً به عنوان معیاری برای مقاومت مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود [Taherkhani, Afroozi, and Javanmard, 2017]. اگر چه برخی محققان مخالف این عقیده هستند [Sengul et al. 2012] و نتایج آزمایشگاهی آنان نشان داده است که این نسبت، به‌خوبی برای مقایسه مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی قابل استفاده نیست. شکل ٦ نتایج نسبت مارشال مخلوط‌ها را نشان می‌دهد که از تقسیم استقامت مارشال به نرمی به دست آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تمامی مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت و روغن بازیافتی

دارای نسبت مارشال کمتری از مخلوط کنترل می‌باشند به غیر مخلوط R50-E10 که کمی بالاتر از مخلوط کنترل است. همچنین، با افزایش مقدار RAP در مخلوط‌های بدون روغن ضایعاتی نسبت مارشال کاهش می‌یابد که دلیل آن بالا بودن نرخ افزایش روانی نسبت به استقامت در مخلوط‌های بدون روغن است. در مخلوط‌های حاوی روغن موتور ضایعاتی و مقادیر بالای RAP با افزایش درصد روغن استقامت مارشال افزایش می‌یابد همانگونه که قبلاً بیان گردید.

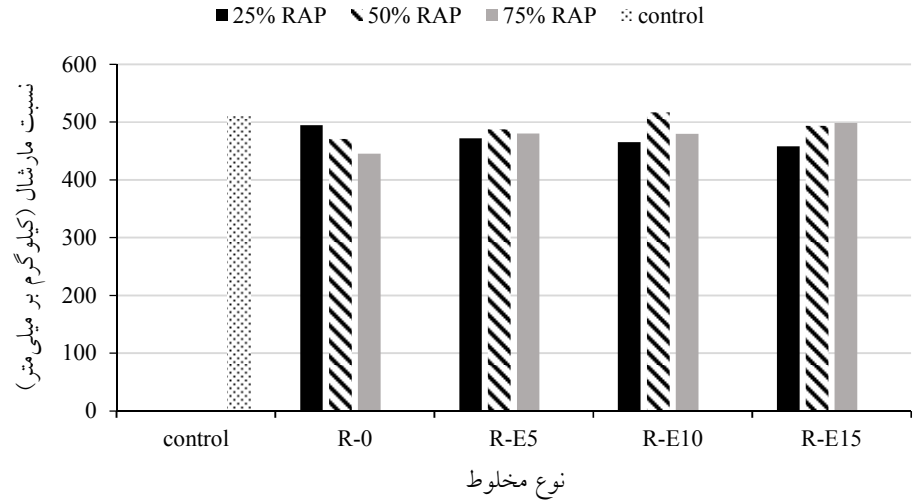
این موضوع به دلیل بهبود خاصیت اندود سنگدانه‌ها با افزایش روغن و همچنین کاهش فضای خالی است. مطابق این نتایج نیز می‌توان بیان نمود که در صورت استفاده از مقادیر بالای خرده آسفالت بازیافتی (۷۵ درصد)، برای داشتن مقاومت بالا در مقابل تغییر شکل، ۱۵ درصد روغن ضایعاتی استفاده گردد.



شکل ٤. نتایج استقامت مارشال مخلوط‌های بازیافتی



شکل ۵. نتایج روانی مارشال مخلوط‌های بازیافتی



شکل ٦. نتایج نسبت مارشال مخلوط‌های بازیافتی

٦-٣ آزمایش خزش دینامیکی

یکی از روش‌های اندازه‌گیری پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم، اعمال بار محوری مشخص تکرارشونده و اندازه‌گیری تغییرشکل ماندگار تجمعی به عنوان تابعی از سیکل‌های بارگذاری و باربرداری است. مهم‌ترین خروجی این آزمایش منحنی خزش است که تغییرشکل دائمی را در برابر تعداد تکرار بار نشان می‌دهد. تغییرات کرنش ماندگار در برابر تعداد تکرار بار برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و بدون عامل جوان‌کننده به شکل منحنی خزش در شکل ۷ ارائه شده است. روسازی‌های آسفالتی ساخته شده با RAP به عنوان روسازی سخت شناخته می‌شوند [DeDene and You, 2014]. روسازی‌های سخت‌تر کمتر متحمل شیارشدگی می‌شوند، بنابراین انتظار می‌رود با افزایش سختی مخلوط به دلیل استفاده از RAP شیارشدگی کمتری رخ دهد. در تطابق با آنچه گفته شد مشاهده گردید با افزودن RAP مقاومت به شیارشدگی نسبت به مخلوط کنترل بهبود می‌یابد. اما با افزایش درصد RAP از ۲۵ به ۵۰ درصد مقاومت به شیارشدگی کاهش یافته است و با افزایش آن به ۷۵ درصد دوباره افزایش یافته و حتی از ۲۵ درصد نیز بهتر شده است. دلیل این موضوع شاید تفاوت در ساختار مخلوط‌ها باشد. بدین صورت که در مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد RAP به احتمال زیاد به دلیل کم بودن مصالح RAP و کم بودن قیر پیرشده، سنگدانه جدید عامل تأثیر گذار در مقاومت است (مثل گوشه داری، با توجه به اینکه گوشه داری مصالح جدید بالاتر از مصالح RAP بود). ولی در مخلوط با ۷۵ درصد RAP مصالح RAP و مقدار قیر پیرشده تأثیر گذار هستند و در مخلوط حاوی ۵۰ درصد RAP حالت بینابینی وجود دارد. دلیل دیگری که می‌توان برای این مورد بیان نمود این است که، به سبب چسبیدن قیر پیرشده به مصالح سنگی و جدا شدن آن‌ها در اثر حرارت توزیع سنگدانه در مخلوط‌های حاوی RAP به هم می‌خورد. بدین صورت که در دانه‌بندی مصالح سنگی قیرهای پیرشده چسبیده به سنگدانه‌ها به عنوان یک سنگدانه با یک اندازه مشخص عمل می‌کنند، اما، بعد از حرارت دادن مصالح RAP و همچنین در اثر اختلاط و تراکم این قیرها از سنگدانه‌ها جدا شده و سبب بهم خوردن توزیع سنگدانه می‌شوند، که به احتمال زیاد در مقاومت به شیارشدگی تأثیرگذار است. همچنین می‌توان این را به افزایش فضای خالی مخلوط در اثر

افزایش مقدار RAP و در نتیجه افزایش قیر بهینه مخلوط‌های حاوی RAP نسبت داد. چون با افزایش مقدار قیر شیارشدگی افزایش می‌یابد و بنابراین تقابل بین افزایش شیارشدگی به دلیل افزایش مقدار قیر و کاهش شیارشدگی به دلیل وجود قیر پیرشده در RAP باعث می‌شود مقدار شیارشدگی مخلوط حاوی ۵۰ درصد RAP پایین‌تر از مخلوط‌های ۲۵ و۷۵٪ درصد باشد.

روندهای مشابه و همچنین متفاوتی به شرح زیر در مطالعات گذشته مشاهده شده است:

ژیا و همکاران (۲۰۱۵) به این نتیجه رسیدند که مقاومت به شیارشدگی مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد RAP بالاتر از مخلوط کنترل است [Jia et al. 2015]. این نتیجه مشابه با یافته‌های گاردنیر و واگنر (۱۹۹۹) می باشد که از دو منبع RAP مختلف استفاده کردند و نشان دادند که RAP شیارشدگی را کاهش می‌دهد[Stroup-Gardiner and Wagner, 1999]. در مطالعه دیگر، اسلام و همکاران (۲۰۱٤) کرنش‌های ماندگار مخلوط‌های حاوی ۰ و ۳۵ درصد RAP را در فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند، وقتی که RAP درون مخلوط HMA ترکیب می‌شود پتانسیل شیارشدگی HMA کاهش می‌یابد [Islam et al. 2014]. نتایج Pereira و همکاران ۲۰۰٤ نیز نشان دادند که مخلوط‌های حاوی RAP رفتار بهتری نسبت به مخلوط کنترل دارند [Pereira, Oliveira, and Picado-Santos, 2004]. در تحقیق دیگری Chehab و Daniel (۲۰۰٦) مخلوط‌های حاوی ۱۵ و ۲۵ و ٤۰ درصد RAP را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که شیارشدگی در افزایش RAP از ۱۵ به ۲۵ درصد اندکی افزایش می‌یابد. اما مقدار شیارشدگی در هنگام افزایش RAP به ٤۰ درصد افت داشت و آن‌ها این افزایش شیارشدگی در مخلوط حاوی ۲۵ درصد RAP را به بالا بودن مقدار قیر مخلوط ۲۵ درصد نسبت دادند [Chehab and Daniel, 2006].

یعقوبی و همکاران ۲۰۱۳ نتیجه‌گیری کردند که مخلوط‌های آماده شده با RAP مقاومت کمتری به تغییرشکل دائمی در مقایسه با مخلوط بکر دارند و بیان کردند که این ممکن است به دلیل روشی باشد که مخلوط‌ها آماده شدند. همچنین، اظهار داشتند که روسازی پیرشده در محل ممکن است مقاومت بیشتری به تغییر شکل دائمی داشته باشد، اما در مخلوط حاوی RAP بدون جوانساز در این مطالعه، اختلاط سنگدانه‌ها با قیری بود که از روسازی آسفالتی پیرشده استخراج شده بود. در واقع، قیر پیر استخراج شده شامل مالتین پایین است که باعث چسبندگی پایین و منجر به مقاومت به تغییر شکل پایین‌تر می‌شود [Yaghoubi et al. 2013].

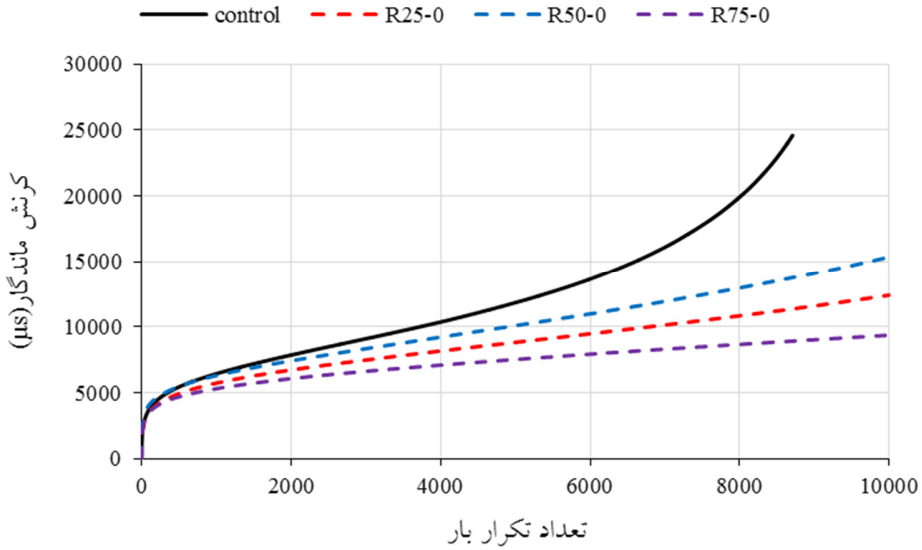
Izaks و همکاران ۲۰۱۵ در مطالعه خود از دو منبع با مقادیر ۳۰ و ۵۰ درصد RAP استفاده کردند و براساس نتایج آزمایشات مخلوط‌های با RAP در مقایسه با مخلوط مرجع، مقاومت به شیارشدگی اندکی بالاتر داشتند و دریافتند که RAP اثر قابل توجهی برروی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی مثل مقاومت به شیارشدگی ندارد [Izaks et al. 2015].

همچنین ددنه و یو (۲۰۱٤) نشان دادند که تغییری در مقاومت به تغییرشکل دائمی مخلوط با ۲٤ درصد RAP و مخلوط کنترل ایجاد نمی‌شود، که دلیل آن پایین بودن مقدار RAP و همچنین پایین بودن قیر پیرشده موجود در RAP بیان گردید [DeDene and You, 2014]. شکل ۸ نمودار کرنش ماندگار در برابر تعداد تکرار بارگذاری مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵درصد RAP و مقادیر مختلف روغن موتور ضایعاتی را در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، مقاومت به تغییرشکل دائمی مخلوط با ۲۵ درصد RAP و بدون جوان‌کننده از همه مخلوط‌ها بالاتر است. که این به دلیل سختی مخلوط به سبب حضور قیر پیرشده در RAP است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که، در مخلوطهای حاوی RAP، افزودن روغن ضایعاتی به مخلوط بازیافتی به طور کلی

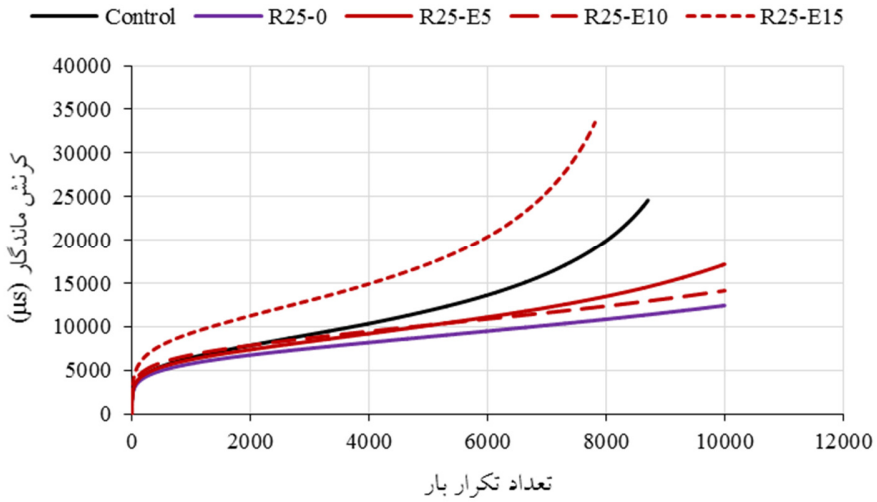
مقاومت به تغییرشکل دائمی را کاهش می دهد، که مشابه با نتایج تحقیقات قبلی [DeDene and You, 2014; Jia et al. 2015] است. با وجود کاهش مقاومت به تغییرشکل دائمی با افزودن جوان‌کننده، مخلوط‌های بازیافتی با ۲۵ درصد RAP و ۵ و ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی همچنان مقاومت بالاتری نسبت به مخلوط کنترل دارند. اما، مخلوط با ۱۵ درصد روغن موتور ضایعاتی دارای مقاومت کمتری است. نکته جالب توجه این است که مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی، بالاترین مقاومت را در بین مخلوط‌های حاوی روغن دارند. افزایش مقاومت به شیارشدگی مخلوط با افزایش مقدار روغن ضایعاتی از ۵ به ۱۰ درصد احتمالاً می‌تواند مربوط به جبران بخش مالتین از دست رفته قیر پیرشده باشد که منجر به افزایش چسبندگی و در نتیجه افزایش مقاومت به تغییرشکل دائمی می‌شود. اما، افزایش مقدار روغن به ۱۵ درصد باعث کاهش ویسکوزیته و همچنین افزایش نرمی قیر می‌شود. علاوه بر این، ممکن است به دلیل مقدار زیاد باعث ایجاد سطح لغزنده بین سنگدانه‌ها شود و بنابراین شیارشدگی افزایش می‌یابد.

شکل ۹ نمودار کرنش ماندگار در برابر تعداد تکرار بارگذاری مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد RAP و مقادیر مختلف WEO و مخلوط کنترل را در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مشابه با مخلوط حاوی ۲۵ درصد RAP، مقاومت به تغییرشکل دائمی مخلوط با ۵۰ درصد RAP و بدون جوان‌کننده از همه مخلوط‌ها بالاتر است. برای مخلوط با ۵۰ درصد RAP نیز مشاهده می‌شود که مخلوطهای حاوی روغن مقاومت به تغییر شکل کمتری از مخلوط بدون روغن دارند و کمترین مقاومت را مخلوط حاوی ۱۵٪ روغن دارد. علاوه بر این، مخلوط‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد WEO مقاومت بالاتری از مخلوط کنترل دارند. همچنین، مخلوط حاوی ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی، بالاترین مقاومت را در بین مخلوط‌های حاوی روغن دارد.

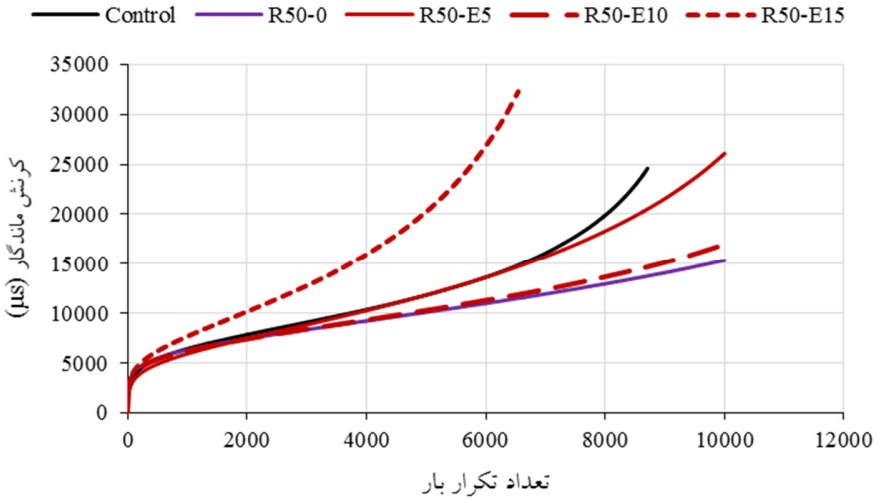
شکل ۱۰ منحنی خزش مخلوط‌های حاوی ۷۵ درصد RAP و مقادیر مختلف WEO و مخلوط کنترل را در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa نشان می‌دهد. نتایج مخلوط‌های حاوی ۷۵ درصد RAP با جوان‌کننده روند و نتایج تقریباً مشابهی را با مخلوط‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد RAP و حاوی روغن‌های ضایعاتی نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار RAP به ۷۵ درصد شیارشدگی به مراتب کمتر اتفاق می‌افتد و علاوه بر این، با افزایش مقدار روغن موتور ضایعاتی در محدوده این مطالعه، مقاومت به شیارشدگی همچنان بهتر از مخلوط کنترل است. در نمونه‌های حاوی ۷۵ درصد RAP نیز مقدار ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی بهترین مقاومت را در بین دیگر مقادیر روغن دارد. در مقایسه مخلوط‌های حاوی ۱۵ درصد روغن ضایعاتی با مخلوط کنترل، با اینکه مقادیر کرنش ماندگار مخلوط‌های حاوی ۱۵ درصد روغن ضایعاتی بالاتر ازمخلوط کنترل است، اما مخلوط کنترل زودتر از آن‌ها به حالت گسیختگی می‌رسد.



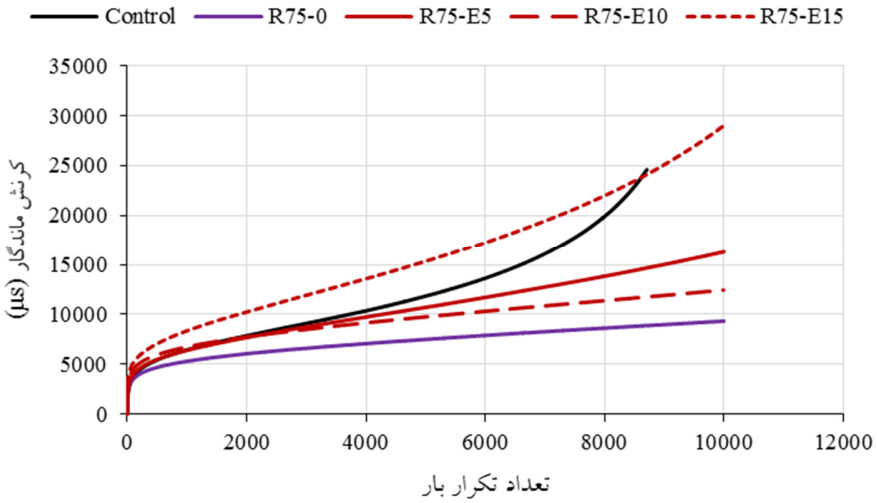
شکل ۷. منحنی‌های خزش مخلوط‌های حاوی RAP بدون جوان‌کننده در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa



شکل۸. منحنی خزش مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد RAP و مقادیر مختلف WEO در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa



شکل۹. منحنی خزش مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد RAP و مقادیر مختلف WEO در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa



شکل۱۰. منحنی خزش مخلوط‌های حاوی ۷۵ درصد RAP و مقادیر مختلف WEO در دمای ۵۰°C و تنش ۳۰۰kPa

٦-٤ نرخ کرنش خزشی

نرخ کرنش خزشی (CSS[10]) به عنوان شاخصی برای مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود [Taherkhani and Arshadi, 2017]، که شیب منحنی خزش در ناحیه دوم منحنی می باشد. با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده توسط [Zhou, Scullion, and Sun, 2004]، مقادیر CSS با استفاده از نرم‌افزار متلب برای تمامی مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن ضایعاتی و بدون آن تعیین شد.

جدول ۷ مقادیر نرخ کرنش خزشی را برای مخلوط‌های مختلف نشان می‌دهد. مقادیر این نرخ ها بر حسب میکرو کرنش در هر سیکل می

باشد. همانگونه که ملاحظه می شود، در مخلوطهای حاوی RAP و بدون جوان کننده، نرخ کرنش با افزایش RAP کاهش می یابد، که نشان دهنده افزایش مقاومت به تغییر شکل است. دلیل این موضوع افزایش سختی مخلوط به دلیل حضور قیر پیرشده بیشتر در مخلوطهای بازیافتی است. همچنین، نتایج نشان می دهند که در مخلوطهای با RAP یکسان، مخلوط با ۱۵ درصد روغن موتور ضایعاتی، بالاترین نرخ کرنش را در میان سایر مخلوطها دارد. این موضوع به دلیل این است که روغن بیش از حد باعث نرم شدگی بیشتر قیر و افزایش تغییر شکل آن خواهد شد. بعلاوه، در مخلوطهای با درصد روغن یکسان، مخلوط حاوی ۵۰٪ از RAP نرخ کرنش بیشتری از مخلوط با ۲۵ و ۷۵٪ RAP می باشد. با این هدف که بیشترین استفاده از آسفالت ضایعاتی در مخلوط به کار رود و خصوصیات خزشی مشابه مخلوط کنترل به دست آید، به نظر می رسد که باید درصد روغنی بین ۱۰ تا ۱۵٪ را به همراه ۷۵٪ RAP استفاده نمود.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد مخلوطهای آسفالتی گرم حاوی مقادیر مختلف روغن‌های ضایعاتی موتور و درصدهای بالای خرده آسفالت بازیافتی از طریق انجام آزمایش‌های مختلف برروی خواص مخلوط آسفالتی گرم از جمله پارامترهای حجمی، استقامت و روانی مارشال و خزش دینامکی برای ارزیابی شیارافتادگی مورد بررسی قرار گرفتند. در محدوده مقادیر به کار رفته از مواد افزودنی و ضایعاتی در این تحقیق نتیجه گیری کلی به شرح زیر را می توان ارائه نمود:

- نتایج خصوصیات حجمی نشان داد استفاده از RAP باعث افزایش درصد فضای خالی و در نتیجه افزایش مقدار قیر بهینه می‌شود، اما با به کارگیری روغن ضایعاتی مقدار قیر بهینه کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش RAP، مقادیر VMA و VFA مخلوطها افزایش می‌یابد و با افزودن روغن درصد VMA کاهش می‌یابد اما VFA روند افزایشی دارد.
- افزودن خرده آسفالت بازیافتی به مخلوط آسفالتی به دلیل وجود قیر پیر شده باعث افزایش استقامت مارشال می‌شود.
- خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط باعث کاهش کارایی شده و انجام اندود را مشکل کرده که منجر به افزایش روانی و کاهش نسبت مارشال می‌گردد.
- استفاده از مقدار مناسبی از روغن‌های ضایعاتی باعث بهبود عمل اختلاط شده و اندود سنگدانه‌ها را بیشتر نموده و خصوصیات مقاومتی را افزایش می‌دهد. اما افزایش بیش از حد روغن اثر معکوس داشته و به دلیل نرم‌تر شدن زیاد باعث کاهش مقاومت و سختی مخلوط می‌گردد.
- مقاومت به شیارشدگی مخلوطهای حاوی RAP نسبت به مخلوط کنترل افزایش می‌یابد، اگرچه رابطه مستقیمی بین افزایش RAP و افزایش مقاومت به شیارشدگی مشاهده نشده و ۵۰ درصد RAP پایین‌ترین مقدار را در بین مخلوطهای حاوی RAP نشان داد.
- مخلوطهای حاوی RAP و روغن موتور ضایعاتی مقاومت به شیارشدگی پایین‌تری نسبت به مخلوطهای حاوی RAP و بدون روغن ضایعاتی نشان دادند. همچنین، از نظر مقاومت به شیارشدگی در مخلوطهای با مقدار RAP یکسان، استفاده از ۱۰ درصد روغن موتور ضایعاتی بهترین عملکرد را نسبت به سایر مقادیر روغن نشان داد. علاوه بر این، در بین مخلوطهای با جوانساز مخلوط حاوی ۱۰ درصد روغن ضایعاتی موتور و ۷۵ درصد RAP، بیشترین مقاومت را به شیارشدگی داشت.

- نتایج نرخ کرنش خزشی به عنوان معیاری برای مقاومت در برابر شیارشدگی نشان داد که در مخلوط‌های بدون روغن ضایعاتی نرخ کرنش با افزایش RAP کاهش می یابد. در مخلوط‌های حاوی RAP یکسان، نرخ کرنش مخلوط حاوی ۱۰٪ روغن کمتر از بقیه، و در مخلوط حاوی روغن یکسان، مخلوط حاوی ۵۰٪ RAP مقاومت کمتری از بقیه دارد.
- از نتایج این تحقیق می‌توان بیان نمود که اگر هدف به کارگیری درصد آسفالت بازیافتی زیاد (مثلا ۷۵ درصد) در مخلوط بدون کاهش در استقامت، سختی و همچنین مقاومت به شیارشدگی نسبت به مخلوط کنترل باشد، می‌توان پیشنهاد داد که حدود ۱۳٪ روغن موتور ضایعاتی در مخلوط استفاده گردد.
- خصوصیات دیگر مخلوط‌های حاوی درصد بالای آسفالت بازیافتی و روغن‌های ضایعاتی نیاز به بررسی و مطالعه دارد، از قبیل مقاومت در برابر ترک خوردگی و خستگی.
-

جدول ۷. نرخ کرنش خزشی منحنی خزش مخلوط‌های حاوی RAP بدون روغن ضایعاتی و با روغن ضایعاتی در دمای ۵۰°C

مخلوط	نرخ کرنش خزشی	مخلوط	نرخ کرنش خزشی	مخلوط	نرخ کرنش خزشی
Control	۱/٤٥٤	Control	۱/٤٥٤	Control	۱/٤٥٤
R25-0	۰/٦٨٧٧	R50-0	۰/٩٥٦٥	R75-0	۰/۳۷٤٦
R25-E5	۱/۱٥	R50-E5	۱/٥٩٩	R75-E5	۱/۰٤۷
R25-E10	۰/۷٤۷٦	R50-E10	۱/۱۲۹	R75-E10	۰/٥٥٥۳
R25-E15	۲/۱۰۲	R50-E15	۲/۸۸	R75-E15	۱/۹۱٥

۸. پی نوشت‌ها

1.Reclaimed Asphalt Pavement
2.Waste Engine Oil
3.Used Lubricant Oil
4. Dedene
5. Reclaimed Asphalt Binder
6. Jia
7. Fine Aggregate Angularity
8. Monismith
9. Heavy Vacuum Slop
10. Flow Number

۹. مراجع

-Ali, A. W., Mehta, Y. A., Nolan, A., Purdy, C. and Bennert, T. (2016) 'Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators', Construction and Building Materials, Vol.110, pp.211–217.

-Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. (2013) 'Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag', Construction and Building Materials, Vol.49, pp.611–617.

-Borhan, M. N., Suja, E., Ismail, A. and Rahmat, R. A. O. K. (2007) 'Used Cylinder Oil Modified Cold—Mix Asphalt Concrete', Journal of Applied Sciences, Vol.7,No.22, pp.3485–3491.

-Chehab, G. and Daniel, J. (2006) 'Evaluating recycled asphalt pavement mixtures with mechanistic-empirical pavement design guide level 3 analysis', Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1962, pp.90–100.

-Chen, J.-S., Chen, S.-F., Liao, M.-C. and Huang, S. W. (2014) 'Laboratory evaluation of asphalt blends of recycling agents mixed with aged binders', Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.27,No.4, pp.4014143.

-DeDene, C. D., and You, Z.-P. (2014) 'The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil', International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.7,No.2, pp.145–152.

-Dokandari, P. A., Kaya, D., Sengoz, B. and Topal, A. (2017) 'Implementing Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement', Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17), Barcelona, Spain :2-4 April 2017. https://doi.org/10.11159/icsenm17.142.

-Im, S., Zhou, F., Lee, R. and Scullion, T. (2014) 'Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials', Construction and Building Materials, Vol.53, pp.596–603.

-Islam, M. R., Mannan, U. A., Rahman, A. S. M. A. and Tarefder, R. A. (2014) 'Effects of reclaimed asphalt pavement on hot-mix asphalt', Advances in Civil Engineering Materials, Vol.3,No.1, pp.291–307.

-Pereira, P. A. A., Oliveira, J. R. M. and Picado-Santos, L. G. (2004) 'Mechanical characterisation of hot mix recycled materials', International Journal of Pavement Engineering, Vol.5,No.4, pp.211–220.

-Romera, R., Santamaría, A., Peña, J. J., Muñoz, M. E., Barral, M., García, E. and Jañez, V. (2006) 'Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen', Rheologica Acta, Vol.45,No.4, pp.474–478.

-Sabouri, M., Bennert, T., Daniel, J. S. and Kim, Y. R. (2015) 'Fatigue and rutting evaluation of laboratory-produced asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement', Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.2506, pp.32–44.

-Sengul, C. E., Aksoy, A., Iskender, E. and Ozen, H. (2012) 'Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance', Construction and Building Materials, Vol.30, pp.139–148.

-Shen, J., Amirkhanian, S., and Aune Miller, J. (2007) 'Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement', Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.19,No.5, pp.376–384.

-Sondag, M. S., Chadbourn, B. A., Drescher, A., Bruce A. Chadbourn, A. and Drescher, A. (2002) 'Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures', Report No. MN/RC-2002-15, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN.

-Stroup-Gardiner, M. and Wagner, C. (1999) 'Use of reclaimed asphalt pavement in Superpave hot-mix asphalt applications', Transportation Research

-Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I. and Zaumanis, M. (2015) 'Hot mix asphalt with high RAP content', Procedia Engineering, Vol.114, pp.676–684.

-Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S. and Sun, L. (2016) 'Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders', Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.29,No.3, pp.D4016003.

-Jia, X., Huang, B., Moore, J. A. and Zhao, S. (2015) 'Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement', Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.27,No.12, pp.4015042.

-Kamaruddin, M., Hidayah, N., Hainin, M. R., Abdul Hassan, N., Abdullah, M. E. and Yaacob, H. (2014) 'Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil', Journal of Teknologi, Vol.71,No.3, pp.93–98.

-Khodaii, A. and Mehrara, A. (2009) 'Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test', Construction and Building Materials, Vol.23,No.7, pp.2586–2592.

-Maceiras, R., Alfonsín, V. and Morales, F. J. (2017) 'Recycling of waste engine oil for diesel production', Waste Management, Vol.60, pp.351–356.

-Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S. and Austerman, A. J. (2013) 'Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures', Road Materials and Pavement Design, Vol.14,No.sup2, pp.193–213.

(2009) ‘Characteristics of rejuvenated bitumen with used lubricating oil as rejuvenating agent’, International Conference On Sustainable Infrastructure And Built Environment In Developing Countries. Bandung, West Java, Indonesia.

-Zaumanis, M., Mallick, R. B. and Frank, R. (2014) ‘Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications’, Construction and Building Materials, Vol.69, pp.159–166.

-Zaumanis, M., Mallick, R. B. and Frank, R. (2015) ‘Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt’, Materials and Structures, Vol.48,No.8, pp.2475–2488.

-Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L. and Frank, R. (2014) ‘Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures’, Construction and Building Materials, Vol.71, pp.538–550.

-Zhang, J. (2010) ‘Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance’, University of Nebraska, Lincoln., pp.89.

-Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L. (2004) ‘Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes’, Journal of Transportation Engineering, Vol.130,No.4, pp.486–494.

Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1681, pp.1–9.

-Taherkhani, H., Afroozi, S. and Javanmard, S. (2017) ‘Comparative Study of the Effects of Nanosilica and Zyco-Soil Nanomaterials on the Properties of Asphalt Concrete’, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.29,No.8, pp.4017054.

-Taherkhani, H., and Arshadi, M. R. (2017) ‘Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate’, Road Materials and Pavement Design, pp.1–18.

-Veeraragavan, R. K. (2016) An Investigation of the Performance of Hot Mix Asphalt (HMA) Binder Course Materials with High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Rejuvenators. Worcester Polytechnic Institute. https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-042816-163006/unrestricted/rveeraragavan.pdf

-Xiao, F., Amirkhanian, S. and Juang, C. H. (2007) ‘Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures’, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.19,No.6, pp.475–483.

-Yaghoubi, E., Ahadi, M. R., Alijanpour Sheshpoli, M., and Jahanian Pahlevanloo, H. (2013) ‘Evaluating the performance of hot mix asphalt with reclaimed asphalt pavement and heavy vacuum slops as rejuvenator’, International Journal of Transportation Engineering, Vol.1,No.2, pp.115–124.

-Zamhari, K. A., Hermadi, M. and Fun, C. W.

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم وصنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه ناتینگهام انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان .مصالح و مواد روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان است.

فرید نوریان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹٤ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۹٦ از دانشگاه زنجان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مصالح روسازی و مخلوطهای آسفالتی می باشد.

حسین بیات، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه صنعتی شریف اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- سازه را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان اجرای ساختمان، مدیریت اجرا و مصالح ساختمانی و تکنولوژی بتن است.