

بررسی اثرات پیرشدگی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت بازیافتی درصد بالا و روغن خوراکی ضایعاتی

مقاله علمی - پژوهشی

حسن طاهرخانی*، دانشیار، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
میثم عباسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

صفحه ۶۱-۷۸

چکیده

در این تحقیق تاثیر پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر خصوصیات آسفالت بازیافتی حاوی درصد بالای خرده آسفالت ضایعاتی و جوان‌سازی شده با درصدهای مختلف روغن خوراکی ضایعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، ماکزیمم بخش درشت دانه سنگدانه های بتن آسفالتی با خرده آسفالت بازیافتی جایگزین شده و به مخلوط درصدهای مختلفی از روغن خوراکی ضایعاتی شامل ۰، ۷، ۱۰ درصد (بر حسب وزن کل قیر مخلوط) افزوده شده و مخلوط‌ها تحت شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت قرار گرفته و خصوصیات حجمی، مارشال و شن‌زدگی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. این ویژگی‌ها در حالت بدون پیرشدگی نیز ارزیابی گردیده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مخلوط آسفالتی حاوی خرده آسفالت ضایعاتی، *VMA*، استقامت مارشال، روانی و شن‌زدگی بیش‌تری از مخلوط کنترل ساخته شده با مصالح سنگی بکر دارد. اما با افزایش روغن ضایعاتی این ویژگی‌ها کاهش می‌یابند. با اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت *VMA*، استقامت مارشال و شن‌زدگی مخلوط‌ها افزایش و روانی مارشال کاهش می‌یابند که مقدار تغییرات در پیرشدگی بلندمدت بیش‌تر است. با بررسی شاخص پیرشدگی به دست آمده، اثر پیرشدگی در مخلوط‌های حاوی درصدهای بالای روغن خوراکی بیش‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیرشدگی خرده آسفالت بازیافتی، روغن خوراکی ضایعاتی، خصوصیات حجمی، مارشال، شن‌زدگی

۱- مقدمه

حجم ترافیک و بار محوری و عدم به‌کارگیری روش‌های اجرا و نگهداری روسازی، منجر به ایجاد خرابی‌های زودرس و فرسودگی سریع روسازی راه‌های کشور شده است. مرمت و بهسازی این دسته از راه‌ها، افزایش قابل توجه مصرف مصالح سنگی و قیر و تولید حجم گسترده مصالح خرده آسفالت ناشی از تراش روسازی‌های فرسوده را در پی داشته است. از طرف دیگر، محدودیت منابع قیر و مصالح سنگی مرغوب، حفظ و نگهداری منابع طبیعی غیرقابل جایگزین، مدیریت انرژی و هزینه‌های اجرای لایه روسازی؛ لازمه توسعه و نگهداری شبکه

پیرشدگی مخلوط آسفالتی یکی از فرآیندهای طبیعی است که طی آن قیر موجود در مخلوط آسفالتی تحت واکنش‌های شیمیایی و اثرات فیزیکی سخت گشته و روسازی را با تغییرات عمده‌ای از جهت سازه‌ای و دوام مواجهه می‌سازد. از جنبه‌های مثبت پیرشدگی می‌توان به افزایش استحکام ناشی از زیاد شدن سختی قیر و از جنبه‌های منفی آن می‌توان به افزایش حساسیت در برابر ترک‌های خستگی و حرارتی اشاره نمود (Hawks et al., 1993; Azimi Alamdari et al., 2019). از سویی دیگر، در کنار عامل پیرشدگی، افزایش قابل توجه

آن بازگردد (DeDene and You, 2014). طی سال‌های گذشته از انواع مختلف مواد با پایه روغن برای جوان‌سازی قیر پیرشده و مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP استفاده گردیده است. 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; Liu et al., 2019)، روغن خوراکی ضایعاتی (Dokandari et al., 2017; Zaumanis et al., 2014)، گریس خوراکی ضایعاتی، روغن آلی، عصاره آروماتیک، روغن تال مقطر، (Zaumanis et al., 2014)، روغن روان‌کاری (Zamhari, Hermadi, and Fun, 2009)، روغن نفتیک، روغن پارافین، عصاره آروماتیک، روغن تال و اسید اولئیک (Ali et al., 2016; Hong et al., 2020)، روغن‌های زیستی (Xu et al., 2019; Zhang et al., 2019) اشاره نمود. با توجه به افزایش سطح تقاضا برای جوان‌کننده‌ها در سال‌های اخیر، مسئله هزینه تهیه این مواد موضوع نگرانی شده است. از این رو، استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جوان‌کننده علاوه بر کمک به حفظ محیط زیست باعث اقتصادی‌تر شدن بازیافت می‌گردد. یکی از این مواد ضایعاتی که قابلیت استفاده به عنوان جوان‌ساز را دارد روغن خوراکی ضایعاتی می‌باشد. از مهمترین منابع تولید روغن خوراکی ضایعاتی منازل، رستورانها، هتل‌ها و صنایع غذایی می‌باشند. هرساله حجم قابل توجهی از روغن خوراکی ضایعاتی در دنیا تولید می‌شود. حجم سالیانه تولید روغن خوراکی ضایعاتی در چین ۸۲۶ میلیون و در آمریکا ۳ میلیون گالن است (Ahmed and Hossain, 2020). در ایران نیز سالیانه یک میلیون ۴۰۰ هزار تن روغن خوراکی تولید می‌شود که حدود ۲۰٪ از آن به صورت روغن مصرف نشده، زائد یا سوخته به محیط زیست باز می‌گردد. دور ریز روغن‌های خوراکی ضایعاتی یکی از دغدغه‌های زیست محیطی است. در روغنهای ضایعاتی در اثر حرارت دیدن و ترکیب شدن با اکسیژن و یا تجزیه برخی از مولکول‌های آن ترکیبات مختلف جدیدی تشکیل می‌شود که اگر در محیط زیست رها شده و یا به درستی بازیافت نگردند پیامدهای بسیار نامطلوبی را به همراه خواهد داشت. یکی از اثرات منفی روغن‌های ضایعاتی ایجاد صفحات غیر قابل نفوذ برای هوا و آب و سایر مواد معدنی و جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌های مفید خاک می‌باشد. به دلیل پخش روغن در سطح آب حجم بسیار زیادی از آب توسط روغن‌های ضایعاتی آلوده می‌گردد. همچنین، روغن‌های ضایعاتی باعث افزایش هزینه تصفیه فاضلاب‌ها

راه‌ها به کمک روش‌های نوین و نیز حل معضلات زیست محیطی ناشی از تولید مصالح فرسوده و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و بازیابی انرژی‌های مصرفی در تولید ضایعات می‌باشند. تراشه‌های آسفالتی حاصل از روسازی‌های قدیمی و پسماند جوان‌سازها از جمله مواد پیرشده و ضایعاتی بازیافتی هستند که در چند سال اخیر متخصصین حوزه راه با مطالعه و ارزیابی مکانیکی و شیمیایی آن‌ها درصدد جایگزین نمودن آن‌ها با مصالح و منابع بکر به روش بازیافت می‌باشند. خرده آسفالت ضایعاتی در اثر تراشیدن لایه‌های فرسوده آسفالتی روسازی در طی فرایند نگهداری و بازسازی ایجاد می‌گردد. این مصالح به عنوان ضایعات می‌تواند در محل‌هایی دیو گردد و یا از آن استفاده مناسب گردد. دیوی این ضایعات علاوه بر آسیب به زیبایی محیط مشکلات زیست محیطی ناشی از خروج شیرابه‌ها از آن و آلودگی آب و خاک را به همراه خواهد داشت. بنابراین، به کارگیری این مواد ضایعاتی علاوه بر کاهش هزینه‌ها به دلیل کاهش مصرف مواد اولیه، باعث حفظ محیط زیست نیز می‌گردد. اولین استفاده از خرده آسفالت ضایعاتی 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). خرده آسفالت ضایعاتی به عنوان پرکننده، بخشی از مصالح سنگی و قیر در ساخت آسفالت جدید، به عنوان سنگدانه‌ها در لایه‌های اساس و زیر اساس و یا در مصالح سنگی تثبیت شده استفاده گردیده است. به کارگیری خرده آسفالت ضایعاتی در ساخت‌های مخلوط‌های آسفالتی جدید باعث می‌شود از منابع طبیعی و بکر کمتر استفاده شده و در هزینه و انرژی مصرف شده در فرایند تولید و حمل آنها صرفه جویی نمود. با وجود مزایای زیاد در به کارگیری از خرده آسفالت ضایعاتی، پیرشدگی قیر موجود در آن سبب افزایش سختی و ویسکوزیته شده و آن را مستعد ترک خوردگی می‌کند (Veeraragavan, 2019; Dhasmana et al., 2016). مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از قیر نرم‌تر در مخلوط‌هایی با قیر پیرشده در بهبود مقاومت مخلوط‌ها به انتشار ترک کارآمد نبوده و همچنین استفاده از قیر نرم‌تر در درصدهای بالا اقتصادی نبوده، با این حال، استفاده از جوان‌سازها موثرتر است چرا که هر دو ویژگی فیزیکی و شیمیایی قیر پیرشده را بهبود می‌بخشند (Martin et al., 2015; Dhasmana et al., 2019). یکی از راه‌های غلبه بر ضعف آسفالت بازیافتی، استفاده از عوامل جوان‌ساز در مخلوط‌هایی است که حاوی درصد بالایی از خرده آسفالت ضایعاتی هستند. عامل جوان‌ساز باعث می‌شود خواص قیر پیرشده به خواص اولیه

خواهد شد. بنابراین، جمع‌آوری و استفاده صحیح از این ضایعات می‌تواند گام مهمی در حفظ محیط زیست باشد. برخی از کشورها رستوران‌ها و هتل‌ها و کارخانجات تولید مواد غذایی را موظف می‌گردانند تا روغن‌های ضایعاتی خود را به شرکت‌های جمع‌آوری تحویل دهند. خانوارها را نیز می‌توان تشویق نمود که روغن ضایعاتی را به طور جداگانه جمع‌آوری نموده و تحویل دهند. روغن‌های خوراکی ضایعاتی قابل استفاده در تولید انواع مواد شیمیایی، صابون سازی و خوراک دام می‌باشند. یافتن کاربردهای اقتصادی‌تر و سازگارتر با محیط زیست دارای اهمیت می‌باشد. روغن‌های خوراکی ضایعاتی نشان داده که قابلیت بازگرداندن ویژگی‌های اولیه قیرهای پیرشده را دارد. (Zargar et al., 2012; Asli et al., 2014; Chen et al., 2014; Wen et al., 2013; Su et al., 2015; Eriskin et al., 2017, Wan Azahar et al., 2017)

بر مطالعات انجام شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی جوانسازی شده با روغن گیاهی ضایعاتی توسط احمد و حسین (Ahmed and Hossain, 2020) و رمضان سیاه و همکارانش (Ramadhansyah et al., 2020). در تحقیقی آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم، روی نمونه‌های پیرشده کوتاه‌مدت در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های پیرشده بلندمدت جهت بررسی تأثیر پیرشدگی روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با روند پیرشدگی به دلیل سخت شدن نمونه‌ها فضای خالی، VMA، استقامت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش و VFA و روانی مارشال، کاهش می‌یابند (Sarsam and Abdulmajeed, 2014). مطالعه‌ای جهت بررسی تأثیر روغن ضایعاتی خوراکی اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده روی عملکرد مقاومت مارشال و مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی پیرشده انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که با جایگزینی ۵ درصد روغن ضایعاتی خوراکی اصلاح‌شده بجای قیر بهینه، مقاومت مارشال و مدول برجهنگی نمونه‌های پیرشده بلندمدت نسبت به نمونه‌های کوتاه‌مدت و کنترل بهبودیافته؛ درحالی‌که استفاده از روغن‌های خوراکی ضایعاتی اصلاح‌نشده به دلیل مقادیر بالای اسیدیته سبب تضعیف عملکرد می‌شود. آن‌ها نتیجه گرفتند که روغن اصلاح‌شده را می‌توان به عنوان جایگزین قیر به دلیل عملکرد بالاتر در پیرشدگی نسبت به مخلوط کنترل استفاده نمود (Jaya et al., 2018). نتایج بررسی اثر جوان‌سازها بر پیرشدگی قیر با استفاده از طیف سنجی فوری نشان می‌دهد که قیرهای پیرشده حاوی جوان‌ساز با درجه نفوذ تقریباً برابر با قیر تازه، تحت پیرشدگی بیش‌تری نسبت

به قیر تازه قرار دارند (Ongle and Hugener, 2015). اما، کنگ و همکارانش نشان دادند که روغن خوراکی ضایعاتی مقاومت به پیرشدگی قیر را افزایش می‌دهد (Cong et al., 2020) ارزیابی آزمایشگاهی خواص بتن آسفالتی شامل درصد‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از RAP و درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از روغن خوراکی ضایعاتی به عنوان عامل بازیافتی با استفاده از آزمایش‌های مارشال، روانی، کشش غیرمستقیم، خزش دینامیکی، رفتار خستگی در حالت تنش ثابت و خصوصیات حجمی انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که فضای خالی و درصد قیر بهینه مخلوط‌ها با افزایش درصد روغن کاهش و با افزایش میزان RAP افزایش می‌یابد. استقامت مارشال، روانی و مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد RAP افزایش‌یافته و با افزایش درصد روغن، کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقاومت شیارشدگی در حالت کلی با افزودن RAP افزایش یافته و با افزودن روغن خوراکی ضایعاتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقاومت به خستگی با افزایش درصد RAP افزایش و با افزایش درصد WVO کاهش یافته است (Taherkhani and Noorian, 2019). با انجام آزمایش‌های مکانیکی فرآیند اختلاط قیر پیرشده و قیر بکر را مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که قیر پیرشده و قیر بکر در مخلوط آسفالتی بازیافتی به طور کامل ترکیب نمی‌شوند و دلیل آن وجود توده‌هایی از سنگدانه-قیر یا فیلر-قیر در RAP است که نفوذ قیر بکر یا عامل جوان‌کننده را با مشکل روبرو می‌کند؛ در نتیجه قیر جدید در آسفالت بازیافتی باعث تشکیل لایه‌ای در اطراف توده سنگدانه-قیر می‌شود؛ لذا، ناحیه‌هایی با ویسکوزیته پایین (قیر جدید) در مخلوط بازیافتی به وجود می‌آید و خواص مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Oliver, 2011). استفاده از مواد افزودنی در مخلوط آسفالتی باید از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. علیرغم انجام مطالعات مختلف بر روی اثرات استفاده از روغن خوراکی ضایعاتی بر مشخصات بتن آسفالتی، اثر پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت بر روی مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی و روغن خوراکی ضایعاتی مورد مطالعه قرار نگرفته است و هم‌چنین با توجه به تحقیقات گذشته که وابسته به نوع جوان‌ساز، مقدار افزودنی جوان‌ساز با توجه به وجود توده‌هایی از سنگدانه/قیر یا فیلر/قیر در RAP می‌تواند بر سرعت نفوذ و انتشار جوان-سازها در میزان مشارکت قیر پیرشده با قیر بکر و اقتصادی نمودن میزان مصرف جوان‌ساز در جهت برابر و یا بهتر نمودن مشخصات عملکردی مخلوط‌های بازیافتی نسبت به مخلوط‌های کنترلی عمل نماید؛ در این تحقیق ماکزیم مقدار

درشت دانه RAP (۹۶ درصد درشت دانه RAP نسبت به کل مصالح درشت دانه حد میانی نشریه ۲۳۴) با مینیمم نمودن ریزدانه آن از ریزدانه‌های مصالح بکر جایگزین درشت‌دانه‌های مصالح سنگی شد که در تحقیقات قبلی انجام نشده و خصوصیات حجمی، مارشال و کانتابرو آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

در این پژوهش برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم، قیر ۱۰۰-۸۵ درجه نفوذی استفاده شد که این قیر از پالایشگاه امام خمینی سازند تهیه گردید. جدول ۱ برخی از مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد که توسط شرکت ارایه گردیده‌اند. مصالح سنگی جدید مورد استفاده در ساخت مخلوط آسفالتی بازیافتی از جنس سیلیسی با فیلر سیلیسی (پودر سنگ مصالح سیلیسی) می‌باشد که از شرکت زنجان رهساز در شهر زنجان تهیه گردید. مشخصات فنی مصالح سنگی در جدول ۲ ارایه شده است که جوابگوی الزامات نشریه ۲۳۴ می‌باشد.

همچنین وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی در جدول ۳ ارایه شده است. مصالح خرده آسفالت استفاده شده در این تحقیق از انبار دپوی مصالح خرده آسفالت واقع در راهدارخانه عدل (۷۰ کیلومتری آزادراه زنجان-تبریز) تهیه شد. نمونه تهیه شده باید به صورتی باشد که معرف خواص کل مصالح باشد تا تغییرات در مشخصات مصالح کاهش یابد. درصد قیر مصالح RAP با استفاده از روش تجزیه آسفالت به وسیله سانتریفوژ مطابق با استاندارد

در این پژوهش برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم، قیر ۱۰۰-۸۵ درجه نفوذی استفاده شد که این قیر از پالایشگاه امام خمینی سازند تهیه گردید. جدول ۱ برخی از مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد که توسط شرکت ارایه گردیده‌اند. مصالح سنگی جدید مورد استفاده در ساخت مخلوط آسفالتی بازیافتی از جنس سیلیسی با فیلر سیلیسی (پودر سنگ مصالح سیلیسی) می‌باشد که از شرکت زنجان رهساز در شهر زنجان تهیه گردید. مشخصات فنی مصالح سنگی در جدول ۲ ارایه شده است که جوابگوی الزامات نشریه ۲۳۴ می‌باشد.

همچنین وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی در جدول ۳ ارایه شده است. مصالح خرده آسفالت استفاده شده در این تحقیق از انبار دپوی مصالح خرده آسفالت واقع در راهدارخانه عدل (۷۰ کیلومتری آزادراه زنجان-تبریز) تهیه شد. نمونه تهیه شده باید به صورتی باشد که معرف خواص کل مصالح باشد تا تغییرات در مشخصات مصالح کاهش یابد. درصد قیر مصالح RAP با استفاده از روش تجزیه آسفالت به وسیله سانتریفوژ مطابق با استاندارد

۲- مواد آزمایش و طرح اختلاط

۲-۱- مشخصات مواد و مصالح مصرفی

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی

درجه نفوذ (dmm)	نقطه نرمی (°C)	خاصیت انگمی (Cm)	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ (°C) (Pa.s)	نقطه اشتعال (°C)
۹۰-۹۱	۴۷/۲	۱۵۰	۰/۲۷۱	۳۱۰



شکل ۱. دستگاه کروماتوگرافی گازی و روغن ضایعاتی خوراکی استفاده شده در این تحقیق

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی جدید

نتایج آزمایش			روش آزمایش	مشخصه	
فیلر	ماسه	مخلوط درشت دانه			
-	۶۳	-	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای	
-	-	C	AASHTO-T96	نوع دانه بندی	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس
-	-	۵۰۰		تعداد دور	
-	-	۱۶		درصد سایش	
-	N.P	-	AASHTO-T89,90	دامنه خمیری (PI)	حدود اتربرگ
-	-	-		حد خمیری (PL)	
-	غیر قابل تعیین	-		حد روانی (LL)	
-	-	۹۸	ASTM-D5821	در یک جبهه	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک ۴
-	-	۹۷		در دو جبهه	
جدایی فیلم نازک فیر از مصالح سنگی مشاهده نگردد.			ASTM-D3625	تأثیر آب بر روی پوشش قیری مصالح سنگی با استفاده از آب جوشان	
-	۴۰/۳	-	ASTM-C1252-C	درصد گوشه داری مصالح ریزدانه (FAA)	
-	۵۰	-	ASTM-C25,575	درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO ₂)	
-	۳/۴۷	-	AASHTO-T27	ضریب نرمی ماسه	
-	-	۱۳	BS-812	درصد تورق	
-	-	۱/۲	ASTM-D4791	درصد دانه‌های پهن و دراز	
-	۱	-	AASHTO-T104	ریزدانه	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
-	-	۱		درشت دانه	

جدول ۳. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی بکر

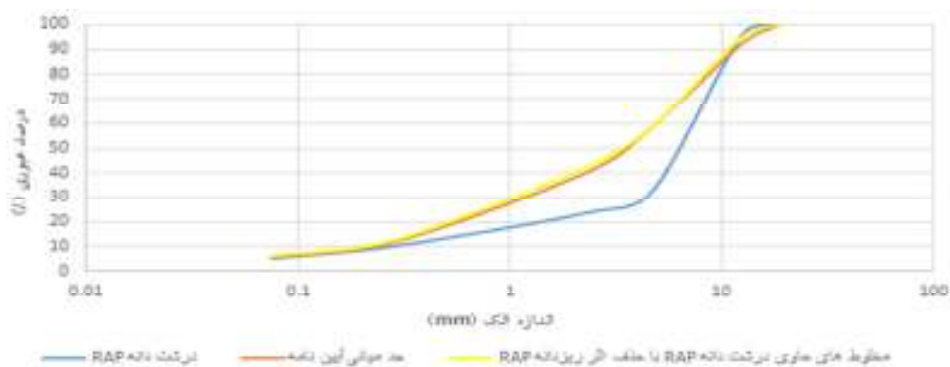
درصد جذب آب	چگالی نسبی (وزن مخصوص)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱/۵	۲/۶۴۸	۲/۷۶	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۹	۲/۶۰۵	۲/۷۴	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
—	۲/۷		مصالح سنگی مانده رد شده از الک شماره ۲۰۰
۲/۶۳۵			چگالی نسبی (وزن مخصوص) حقیقی مخلوط مصالح سنگی Gsb

جدول ۴. مشخصات مصالح RAP

محدوده (درصد)	نتایج آزمایش (درصد)	استاندارد مورد آزمایش	آزمایش
—	۳/۷۷	ASTM-D2172	درصد فیر موجود در درشت دانه RAP
حداقل ۹۰	۹۰	ASTM-D5821	درصد شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه

جدول ۵. اسیدهای چرب استخراج شده از روغن خوراکی ضایعاتی

درصد موجود	نام اسید چرب
۰/۸۳	دو دکانویک اسید ^۲
۱/۹۶	متیل تتر دکانوات ^۳
۲۸/۳۹	هگزادکانویک اسید ^۴
۶۰/۹۲	اکتادکانویک اسید ^۵
۷/۱۳	متیل استارات ^۶
۰/۷۷	ایکوزانویک اسید ^۷



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی بکر و بازیافتی

۲-۲- طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ۵ نوع می‌باشند. یک مخلوط کنترل که متشکل از قیر بکر و مصالح سنگی سیلیسی بکر بوده و در آن از خرده آسفالت ضایعاتی استفاده نگردیده است. این مخلوط در این مقاله با کنترل نشان داده می‌شود. مخلوط دیگر حاوی خرده آسفالت ضایعاتی بوده که جایگزین بخش درشت دانه (مانده بر روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر) بتن آسفالتی گردیده‌اند. این مخلوط با R_0 نمایش داده می‌شود. سه مخلوط دیگر شامل ماکزیمم درشت‌دانه آسفالت ضایعاتی بوده و به آن‌ها به ترتیب ۴، ۷ و ۱۰ درصد روغن خوراکی ضایعاتی اضافه گردیده است که در این مقاله به ترتیب با R_4 ، R_7 و R_{10} نشان داده می‌شوند. درصدهای مورد نظر بر اساس نتایج تحقیقات قبلی (Taherkhani and Noorian, 2019) انتخاب گردیده‌اند. مخلوط‌ها به روش مارشال طرح شده و مقدار قیر بهینه آن‌ها تعیین گردید. برای ساخت مخلوط کنترل، سنگدانه‌های جدید به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به منظور خشک شدن مصالح و رسیدن به دمای مورد نظر در گرم‌خانه قرار گرفتند و قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. در ادامه، مقدار مورد نظر قیر بکر به سنگدانه‌های جدید اضافه شده و اختلاط انجام گرفت. برای مخلوط‌های بازیافتی، مصالح خرده آسفالتی به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و در مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن ضایعاتی، روغن‌های ضایعاتی هنگام اختلاط ابتدا به مصالح خرده آسفالتی افزوده شدند و پس از اختلاط کامل با آن، مصالح سنگی جدید و قیر گرم شده، افزوده شده و تا اختلاط کامل

و پوشش مصالح سنگی با قیر مخلوط شدند. این روش اختلاط مطابق با روش تحقیقات قبلی انجام گرفت (Veeraragavan, 2016).

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 ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و بر روی آنها آزمایش‌های مورد نظر انجام گرفت. پیرکردن کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی مطابق با استاندارد AASHTO-R30 انجام گرفت. مطابق این استاندارد، جهت شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت، مخلوط غیرمتراکم در ضخامت بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر درون یک سینی پهن شده و به مدت ۴ ساعت در یک محفظه با دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد و به جهت یکنواخت‌سازی پیرشدگی در کل مخلوط، هر یک ساعت یکبار مخلوط همزده شد. برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت نیز ابتدا نمونه‌های سستی که در مرحله قبلی پیرشده بودند، بلافاصله متراکم شده و در همان آون، ولی با دمایی معادل ۸۵ درجه سلسیوس و برای مدت ۱۲۰ ساعت جای‌گذاری می‌گردند.

۳- شرح آزمایش‌های انجام شده

برای بررسی اثرات پیرشدگی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت بازیافتی و روغن خوراکی ضایعاتی از خصوصیات حجمی، آزمایش مارشال و کانتابرو استفاده گردید که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

۳-۱- خواص حجمی

استاندارد ASTM-D2041 اندازه‌گیری شدند. با استفاده از وزن مخصوص، Gmb و Gmm و مقدار فضای خالی مخلوطها (Va) و درصد فضای خالی سنگدانه‌ها (VMA) و درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA) تعیین شدند.

وزن مخصوص مخلوط‌های متراکم شده مطابق با روش استاندارد ASTM-D2726 اندازه‌گیری شدند. وزن مخصوص حداکثر تئوری مخلوطها هم‌چنین مطابق با روش

۳-۲- آزمایش استقامت و روانی مارشال

نمونه‌ها از آب خارج و بین فک‌های دستگاه آزمایش مارشال قرار داده شدند و با نرخ ثابت سرعت ۵/۸۰ میلی‌متر بر دقیقه تا لحظه گسیختگی تحت فشار واقع گردید. در نهایت، بیش‌ترین نیروی لازم برای گسیخته شدن نمونه (استقامت مارشال) و تغییر شکل قطری (روانی) اندازه‌گیری شدند.

آزمایش استقامت و روانی مارشال به‌منظور تعیین خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی انجام شد. این آزمایش طبق روش استاندارد ASTM-D1559 انجام گرفت ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای شکل به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با درجه حرارت ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، سپس

۳-۳- آزمایش کانتابرو

نمونه‌های استوانه‌ای مارشال در دستگاه لس آنجلس، بدون گوی‌های فلزی با سرعت ۳۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه دوران نموده و پس از پایان آزمایش، افت وزنی هر نمونه مطابق فرمول زیر محاسبه گردید (Tenza et al., 2014).

جهت تعیین مقاومت به شن زدگی مخلوطها (Pan et al., 2018)، آزمایش کانتابرو برای نمونه‌های خشک طبق استاندارد NLT-352 NLT-362 انجام شد. سه نمونه از هر ترکیب با استفاده از ۷۵ ضربه چکش مارشال به طرفین، تهیه گشت. سه نمونه تحت شرایط خشک به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و پس از عمل آوری،

(۴)

$$CL = \frac{(A-B)}{A} * 100$$

CL: درصداقت وزنی کانتابرو، A: وزن اولیه نمونه، B: وزن نهایی نمونه هستند.

۴- نتایج و مباحث

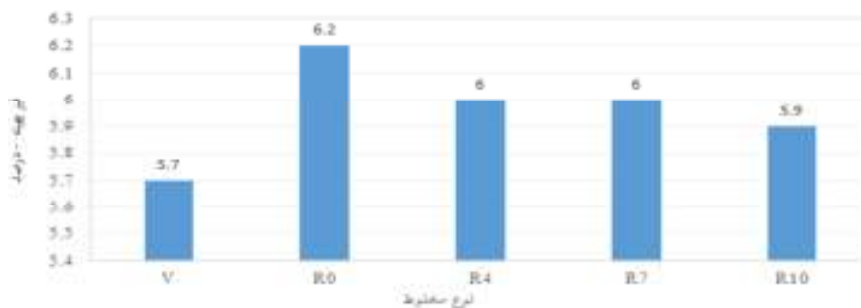
در این بخش مخلوط‌های پیرنشده با اختصار UA (Un Aged)، مخلوط‌های پیرشده کوتاه‌مدت با اختصار STA (Short Term Aging) و مخلوط‌های پیرشده بلندمدت با اختصار LTA (Long Term Aging) بیان گردیده است. پارامترهای حجمی شامل درصد فضای خالی (Va)، فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA) مخلوط‌های آسفالتی با ماکزیمم مقدار درشت دانه RAP (۹۶ درصد درشت دانه

۴-۱- خصوصیات حجمی

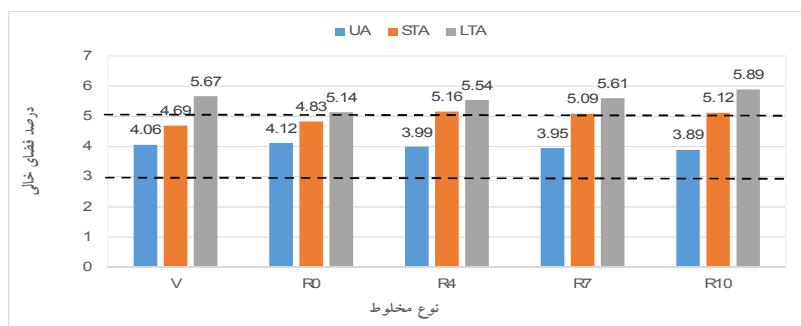
RAP نسبت به کل مصالح درشت دانه حد میانی نشریه (۲۳۴) با مینیمم نمودن ریزدانه آن از ریزدانه‌های مصالح بکر جایگزین درشت‌دانه‌های مصالح سنگی شد و روغن ضایعاتی گیاهی با مقادیر ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد برحسب وزن قیر و مخلوط کنترل بدون RAP و روغن ضایعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج خصوصیات حجمی در شکل‌های ۳ تا ۶ ارائه شده است. در شکل‌های ۴ تا ۶ مقادیر حداقل و حداکثر الزام شده توسط آیین نامه ۲۳۴ نیز به صورت خطوط افقی

قیر RAP، مقدمات پیرشدگی بیش تر را فراهم می نماید. از طرف دیگر مشاهده می گردد مخلوط های حاوی RAP بدون روغن کم ترین تغییر در فضای خالی را به خود گرفته اند که دلیل آن را می توان به تأثیر وجود و ادغام قیر پیرشده RAP با قیر تازه با گذشت زمان که سبب تأثیر سختی قیر پیرشده در قیر تازه گشته که در جهت تأخیر در فرآیند پیرشدگی عنوان نمود (Daniel et al., 2013; Mazzoni et al., 2018). مطابق شکل ۵ مشاهده می گردد که با افزودن RAP مقدار فضای خالی مصالح سنگی (VMA) مخلوطها افزایش می یابد که منطبق با یافته های قبلی است (Jia et al., 2015; Daniel and Lachance, 2005; Solanki et al., 2012) هم چنین، با افزودن روغن، درصد VMA کاهش می یابد که با یافته های محققین قبلی (Jia et al., 2015) هماهنگ است. از آنجا که میزان تراکم برای هر مخلوط ثابت در نظر گرفته شده است، تغییرات VMA به تغییرات در ویسکوزیته قیر و هم چنین نرم شدن قیر به سبب افزودن روغن و اثرات ترکیبی قیر پیرشده و روغن نسبت داده می شوند. علاوه بر این، کاهش VMA می تواند به دلیل افزایش مشارکت قیر RAP در مخلوط در اثر افزودن روغن باشد (Jia et al., 2015). مطابق شکل ۶ مقادیر VFA نیز با افزودن RAP افزایش می یابند که در تطابق با یافته های قبلی هستند (Daniel et al., 2012; Lachance, 2005; Solanki et al., 2012). هم چنین مشاهده می گردد که فرآیند پیری به سبب ترد و شکنندگی و سفت نمودن قیر، سبب افزایش VMA و کاهش VFA در مقایسه با حالت غیر پیرشدگی می گردد که در راستای یافته های گذشته است که بر روی پیرشدگی مخلوط بکر فاقد انجام گردیده است (Sarsam and Abdulmajeed, 2014). با این حال تمامی مقادیر VMA و VFA در محدوده مشخصات فنی آیین نامه در حالت پیرشدگی هستند. این مشاهدات نشان می دهند که روغن ضایعاتی به عنوان عامل کاهش دهنده ویسکوزیته عمل می کند و سبب بهبود کارایی مخلوط آسفالتی می گردد (Ji et al., 2016).

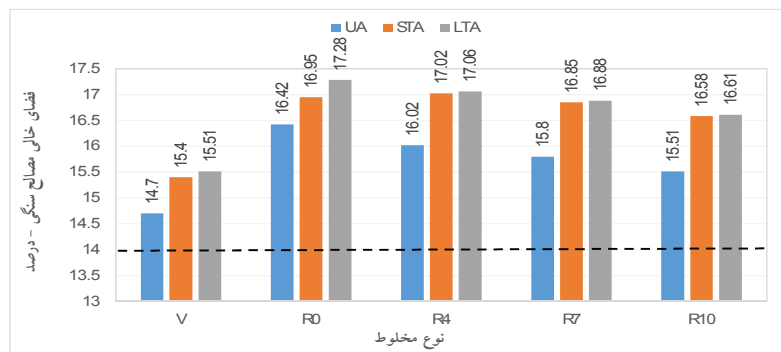
ترسیم گردیده اند. مطابق شکل ۳ و ۴، همان گونه که ملاحظه می گردد، در حالت پیرشدگی مخلوط های بازیافتی بدون روغن ضایعاتی دارای مقدار قیر بهینه بزرگ تری از مخلوط کنترل هستند، که به دلیل افزایش درصد فضای خالی آن در هنگامی است که قیر بهینه مخلوط کنترل برای آن استفاده می شود؛ افزایش درصد فضای خالی نشان می دهد که قیرهای سخت شده RAP به طور کامل با قیر جدید ترکیب نمی شوند و منجر به ایجاد مخلوط با مقدار قیر مؤثر کل کم و در نتیجه کاهش کارایی مخلوط می شود (Zhang, 2010). به همین منظور، درصد قیر افزایش یافت تا جوابگوی درصد فضای خالی مجاز باشد. در شرایطی که از روغن ضایعاتی در مخلوط استفاده می شود درصد قیر بهینه نسبت به مخلوط بدون روغن، کاهش می یابد؛ این موضوع نیز به دلیل نفوذ روغن به درون قیر پیرشده و در نتیجه افزایش مشارکت مقدار قیر پیرشده RAP در مخلوط و افزایش مقدار قیر مؤثر کل مخلوط است که باعث افزایش کارایی مخلوط و راحتی تراکم آن می شود (Mogawer et al., 2013; Jia et al., 2015). در مخلوط های پیرشده کوتاه مدت به دلیل کاهش دمای تراکم ناشی از عمل آوری پیرشدگی کوتاه مدت نمونه ها و تبخیر مواد سبک روغنی؛ هم چنین در مخلوط های پیرشده بلندمدت به دلیل گردش هوای گرم و اکسیداسیون ایجاد شده و حداقل شدن مواد روغنی قیر در جهت کاهش حجم قیر مؤثر و افزایش سفتی قیر، افزایش فضای خالی مشاهده می گردد که در راستای یافته های گذشته است که بر روی پیرشدگی مخلوط بکر فاقد RAP انجام گردیده است (Sarsam and Abdulmajeed, 2014). در واقع روغن خوراکی ضایعاتی سبب روانی قیر در حالت غیر پیرشدگی گشته و در زمان فرآیند پیرشدگی به دلیل اختلاط خشک (اختلاط گشته و در زمان فرآیند پیرشدگی به دلیل اختلاط خشک (اختلاط با مخلوط) سریع تر تحت تأثیر عوامل پیرشدگی قرار می گیرد و مقدار بیش از حد آن در طولانی مدت تحت دماهای بالا سبب افزایش مشارکت با قیر پیرشده و نفوذ بیش از حد در بافت قیر و در نتیجه با توجه به افزایش سطح تماس با اکسیژن و روان نمودن



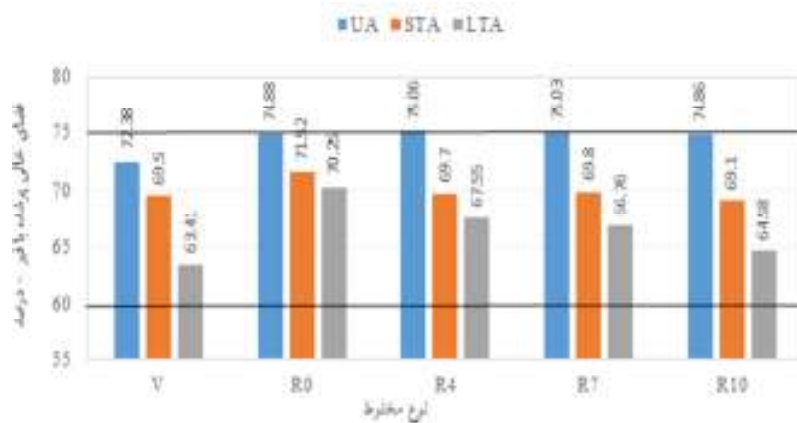
شکل ۳. درصد قیر بهینه انواع مخلوطها



شکل ۴. فضای خالی انواع مخلوطها



شکل ۵. درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۶. درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر

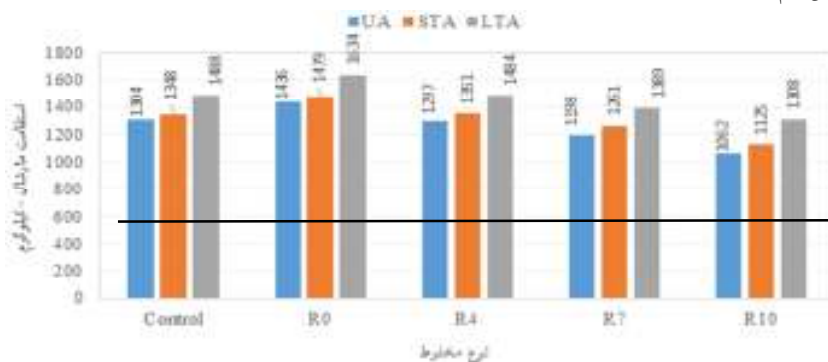
۴-۲- آزمایش مارشال

۴-۲-۱- نتایج استقامت مارشال نمونه‌های پیرنشده و پیرشده

کوتاه‌مدت و بلندمدت

شکل ۷ نتایج استقامت مارشال مخلوط‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی و بدون روغن سختی بیشتر قیر موجود در مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی است (Taherkhani and Noorian, 2019). هم‌چنین، ملاحظه می‌گردد که استقامت مارشال با افزایش درصد روغن به دلیل نرم شدن بیشتر قیر، کاهش یافته است. با

این حال، تمامی مخلوط‌ها در حالت پیرنشده حداقل استقامت مارشال تعیین شده توسط آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) یعنی ۸۰۰ کیلوگرم را برآورده می‌سازند. با توجه به شکل ۷ در اثر پیرشدگی به علت سفت شدن قیر و در نتیجه قوی‌تر شدن پیوند میان قیر و سنگدانه، استقامت مارشال افزایش یافته است که این افزایش استقامت در نمونه‌های پیرشده بلندمدت بیش‌تر است که در راستای یافته‌های گذشته است که بر روی پیرشدگی مخلوط بکر فاقد RAP انجام گردیده است (Sarsam and Abdulmajeed, 2014).



شکل ۷. استقامت مارشال نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت



شکل ۸. روانی مارشال نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت



شکل ۹. نتایج نسبت مارشال نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت

۴-۲-۲- نتایج روانی مارشال نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت

استفاده از روغن باعث نرم‌تر شدن مخلوط می‌گردد و انتظار می‌رود که روانی افزایش یابد. در واقع روغن سبب کاهش پیوستگی قیر شده و همین امر روانی را کاهش می‌دهد (Taherkhani and Noorian, 2019). در اثر پیرشدگی مخلوط سخت گشته و روانی مارشال نسبت به حالت پیرنشده کاهش می‌یابد که در راستای یافته‌های گذشته است که بر روی پیرشدگی مخلوط بکر فاقد RAP انجام گردیده است (Sarsam and Abdulmajeed, 2014). بر طبق آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) حداقل و حداکثر روانی مارشال مجاز برای طراحی روسازی‌های پیرنشده با ترافیک سنگین به ترتیب ۲ و ۳٫۵ میلی‌متر هستند. ملاحظه می‌شود روانی مخلوط‌های پیرنشده در محدوده قابل قبول بر اساس مشخصات فنی هستند و با ادامه روند پیرشدگی و تأثیر بیش‌تر پیرشدگی بر نمونه‌های روغن بازیافتی، روانی کاهش می‌یابد.

شکل ۸ اثر مصالح خرده آسفالت و روغن‌های ضایعاتی را بر روی روانی مخلوط‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در حالت پیرنشده برخلاف انتظار مقدار روانی مخلوط‌های حاوی آسفالت بازیافتی دارای مقادیر بیشتری از مخلوط کنترل هستند که مطابق با یافته‌های گذشته است (Izaks et al., 2015)، اما بر خلاف نتایج تحقیقات قبلی هستند (Dokandari et al., 2017)؛ دلیل تفاوت نتایج این تحقیق با یافته‌های آقازاده دکانداری و همکاران این است که در مطالعه انجام شده توسط آقازاده دکانداری و همکاران مقدار قیر بهینه برای تمامی مخلوط‌ها ثابت در نظر گرفته شده است در حالی که در این تحقیق مقدار فضای خالی تقریباً ثابت در نظر گرفته شده است و افزایش فضای خالی به سبب حضور RAP با افزودن قیر جبران شده است و بنابراین، افزایش قیر در مخلوط‌های حاوی RAP باعث افزایش نرمی مخلوط و در نتیجه افزایش مقدار روانی مارشال شده است. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهند که با افزایش روغن ضایعاتی مقدار روانی کاهش می‌یابد؛ اگرچه

۴-۲-۳- نتایج نسبت مارشال نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت

است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد روغن نسبت مارشال بیش‌تر شده است که ناشی از تغییرات استقامت و روانی در صورت و مخرج کسر نسبت مارشال است که نرخ تغییرات مخرج با افزایش درصد روغن با روند بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها و نسبت به تغییرات افزایشی صورت، کاهش یافته است که سبب بزرگی کسر نسبت مارشال گردیده است. به عبارت دیگر پیرشدگی تأثیر بیش‌تری بر روانی نمونه‌های حاوی روغن، نسبت به استقامت آن‌ها نهاده است.

نسبت مارشال از تقسیم استقامت مارشال به نرمی به دست می‌آید و معمولاً به عنوان معیاری برای مقاومت مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود (Ameri et al., 2013) 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 ۹ نتایج نسبت مارشال مخلوط‌ها را نشان می‌دهد که از تقسیم استقامت مارشال به نرمی به دست آمده

۴-۳-۳- نتایج کانتابرو

مقاومت بهتر نمونه در برابر شن‌زدگی است. با ادامه روند پیرشدگی افزایش افت وزنی و شن‌زدگی نمونه‌ها به دلیل افت پیوستگی و چسبندگی مشاهده می‌گردد. نتایج در راستای یافته‌های گذشته‌ای است که تنها بر روی نمونه‌های حاوی قیرهای بکر پیرشده به روش RTFO^۹ و PAV^۹ انجام گردیده است (Pan et al., 2018).

شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمایش کانتابرو نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت در دمای ۲۵ درجه در حالت خشک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل نمونه‌های RAP بدون روغن بیش‌ترین افت وزنی را به دلیل سختی بالا دارا هستند که نمایانگر کاهش مقاومت آن‌ها در برابر شن‌زدگی است و همچنین با کاهش درصد افت وزنی با افزایش روغن مشاهده می‌گردد و به عبارت دیگر افت وزنی کم‌تر نمایانگر

۴-۴- نتایج شاخص‌های پیرشدگی

می‌گردد و به عبارت دیگر با افزایش درصد روغن در اثر پیرشدگی، تغییرات تشدید می‌گردد به طوری که با توجه به شکل ۱۴ در مخلوط حاوی ۱۰ درصد ضایعاتی، مقاومت به شن زدگی مخلوط بعد از پیرشدگی بلند مدت تا حدود ۵ برابر مقاومت به شن زدگی مخلوط بدون پیرشدگی، کاهش می‌یابد؛ هم‌چنین میزان تاثیر پیرشدگی بر افت وزنی ناشی از آزمایش کانتابرو بیش از آزمایش مارشال است و کم‌ترین تغییرات شاخص پیرشدگی در نمونه‌های بازیافتی متعلق به نمونه R_0 می‌باشد.

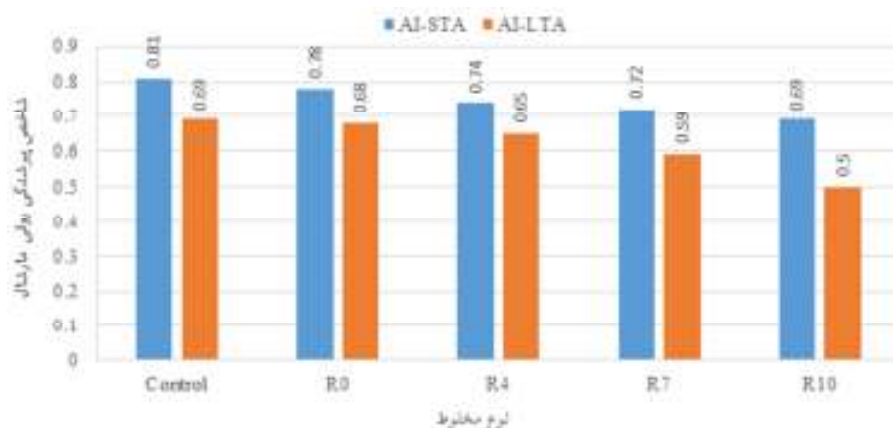
شاخص‌های پیرشدگی از تقسیم نتایج پیرشدگی بلندمدت و کوتاه مدت بر نتایج نمونه‌های پیرنشده تعیین گردیدند که به ترتیب با AI-LTA و AI-STA نشان داده می‌شوند. مقادیر شاخص‌های پیرشدگی مربوط به استقامت مارشال، روانی مارشال، نسبت مارشال و شن‌زدگی حاصل از آزمایش کانتابرو به ترتیب در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ می‌توان دریافت که پیرشدگی بلندمدت بیش‌ترین تأثیر را بر روی نمونه‌های پیرنشده گذاشته است و با افزایش روغن تأثیر بیش‌تر پیرشدگی مشاهده



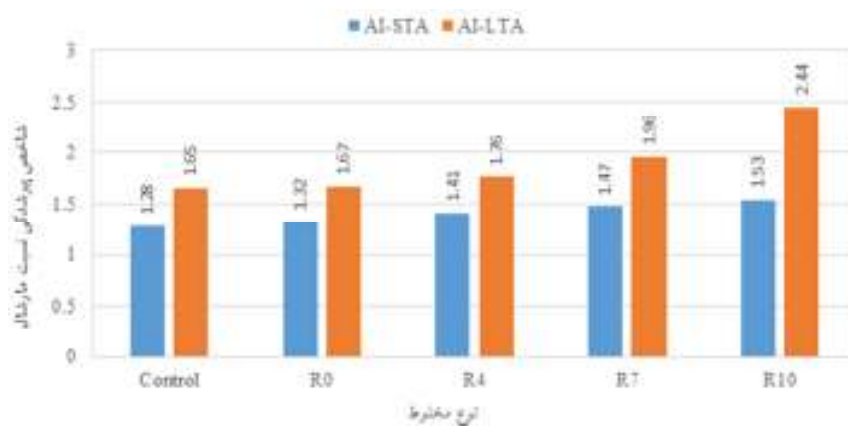
شکل ۱۰. افت وزنی نمونه‌های خشک حاصل از آزمایش کانتابرو



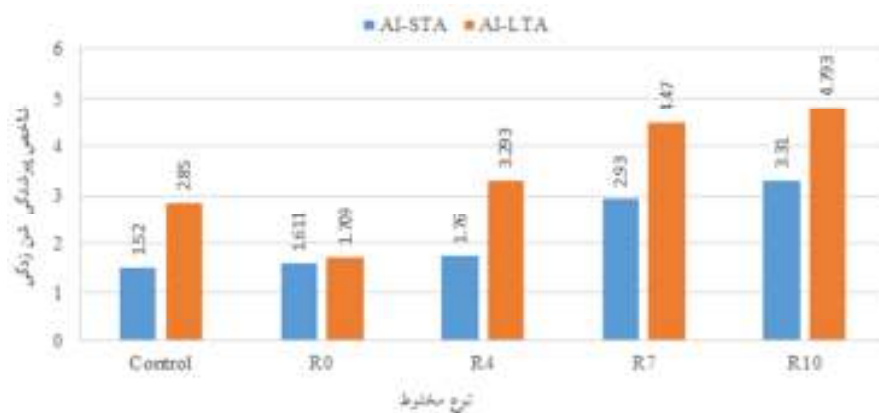
شکل ۱۱. شاخص‌های پیرشدگی استقامت مارشال نمونه‌ها



شکل ۱۲. شاخص‌های پیرشدگی روانی مارشال نمونه‌ها



شکل ۱۳. شاخص‌های پیرشدگی نسبت مارشال نمونه‌ها



شکل ۱۴. شاخص‌های پیرشدگی افت وزنی نمونه‌های خشک حاصل از آزمایش کانابرو

۵- نتیجه گیری

- در این تحقیق تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت بر خصوصیات آسفالت بازیافتی حاوی درصد بالای خرده آسفالت ضایعاتی و جوان سازی شده با درصدهای مختلف روغن خوراکی ضایعاتی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر حاصل گردیده است. مخلوط بازیافتی بدون روغن دارای بیشترین درصد قیر بهینه بوده و با افزایش درصد روغن مقدار قیر بهینه کاهش می یابد.
- فضای خالی نمونه ها در حالت پیرنشده با افزایش درصد روغن کاهش یافته و با اعمال پیرشدگی، افزایش می یابد؛ بطوری که نمونه حاوی بیشترین درصد روغن ضایعاتی دارای بیشترین فضای خالی می باشد.

۶- پی نوشت ها

- 1- Gas Chromatography Mass Spectrometry
- 2- Dodecanoic Acid
- 3- Methyl Tetra Decanoate
- 4- Hexadecanoic Acid
- 5- Octadecadienoic Acid
- 6- Methyl Stearate
- 7- Eicosanoic Acid
- 8- Rolling Thin Film Oven Test
- 9- Pressure Aging Vessel

۷- مراجع

- Ahmed, R. B., & Hossain, K., (2020), "Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review", *Construction and Building Materials*, 230, 116985.
- Ali, A. W., Mehta, Y. A., Nolan, A., Purdy, C., & Bennert, T., (2016), "Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators", *Construction and Building Materials*, 110, pp.211-217.
- Ameri, M., Hesami, S., & Goli, H., (2013), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., & Zaumanis, M., (2015), Hot mix asphalt with high RAP content, *Procedia Engineering*, 114, pp.676-684.
- Mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag, *Construction and Building materials*, 49, pp.611-617.
- Asli, H., et al., (2012), "Investigation on physical properties of waste cooking oil-rejuvenated bitumen binder", *Construction and Building Materials*, 36, pp.102-107.
- نمونه کنترل دارای کمترین VMA و VFA و نمونه R0 دارای بیشترین VMA بوده و با افزایش روغن VMA کاهش و VFA افزایش می یابد و همچنین با روند پیرشدگی VMA نمونه ها افزایش و VFA آن ها کاهش می یابد.
- نمونه بازیافتی فاقد روغن دارای بیشترین استقامت، روانی و نسبت مارشال در حالت پیرنشده می باشد و با افزایش روغن استقامت، روانی و نسبت مارشال کاهش یافته و همچنین پیرشدگی سبب افزایش استقامت و نسبت مارشال و کاهش روانی مارشال می گردد.
- نمونه بازیافتی فاقد روغن دارای بیشترین افت وزنی و کمترین مقاومت در برابر شن زدگی می باشد و با افزایش روغن مقاومت به شن زدگی افزایش می یابد و همچنین پیرشدگی سبب کاهش مقاومت به شن زدگی می گردد.
- کمترین تاثیر پیرشدگی بر خصوصیات مارشال و افت وزنی حاصل از آزمایش کانتابرو مربوط به مخلوطی است که حاوی خرده آسفالت ضایعاتی بوده و از جوان ساز استفاده نشده است.
- میزان تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت از تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر خصوصیات مارشال و شن زدگی کمتر است.
- میزان تاثیر پیرشدگی بر خصوصیات مورد مطالعه با افزایش درصد روغن افزایش می یابد. به طوری که در مخلوط حاوی بیشترین درصد روغن ضایعاتی، مقاومت به شن زدگی مخلوط بعد از پیرشدگی بلند تا حدود ۵ برابر مقاومت به شن زدگی مخلوط بدون پیرشدگی کاهش می یابد.

- and RAP Binder Ratios”, Phase I Interim Report. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Eriskin, E., Sebnem Karahancer, S., Terzi, S., Saltan, M., (2017), “Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4), pp.863-870.
- Hawks, N. F., Teng, T. P., Bellinger, W. Y., Rogers, R. B., Baker, C., Brosseau, K. L., & Humphrey, L. C., (1993). Distress identification manual for the long-term pavement performance project. Strategic Highway Research Program, SHRP-P-338, 15, pp.375-379.
- Hong, W., Mo, L., Pan, C., Riara, M., Wei, M., & Zhang, J., (2020), “Investigation of rejuvenation and modification of aged asphalt binders by using aromatic oil-SBS polymer blend”, *Construction and Building Materials*, 231, 117154.
- Jaya, R. P., Lopa, R. S., Hassan, N. A., Yaacob, H., Ali, M. I., Hamid, N. H. A., & Abdullah, M. E., (2018), “Performance of Waste Cooking Oil on Aged Asphalt Mixture. In E3S Web of Conferences, Vol. 65, pp. 02002, EDP Sciences.
- Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S., & Sun, L., (2016), “Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), D4016003.
- Jia, X., Huang, B., Moore, J. A., & Zhao, S. (2015), “Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015042.
- Kumar Veeraragavan, R., (2016), “An investigation of the performance of hot mix asphalt (HMA) binder course materials with high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) and rejuvenators”.
- Liu, S., Peng, A., Zhou, S., Wu, J., Xuan, W., & Liu, W., (2019), “Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, 223, pp.394-408.
- Mazzoni, G., Bocci, E., & Canestrari, F., (2018), “Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures”, *Journal of Traffic and Transportation and Building materials*, 37, pp.398-405.
- Azahar, W. N. A. W., et al., (2017), “Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil”, *Construction and Building materials*, 150, pp.653-663.
- Azimi Alamdary, Y., Singh, S., & Baaj, H., (2019), “Effect of aggregates containing iron sulphide on asphalt ageing”, *Road Materials and Pavement Design*, pp.1-16.
- Borhan, M. N., Suja, E., Ismail, A., & Rahmat, R. A. O., (2007), “Used Cylinder Oil Modified Cold—Mix Asphalt Concrete”, *Journal of Applied Sciences*, 7(22), pp.3485-3491.
- Chen, M., et al., (2014), “Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders”, *Construction and Building materials*, 66, pp.286-298.
- Cong, P., Chen, B., & Zhao, H., (2020), “Coupling effects of wasted cooking oil and antioxidant on aging of asphalt binders”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(1), pp.64-74.
- Daniel, J. S., & Lachance, A., (2005), “Mechanistic and volumetric properties of asphalt mixtures with recycled asphalt pavement”, *Transportation Research Record*, 1929(1), pp.28-36.
- Dhasmana, H., Hossain, K., & Karakas, A. S., (2019), “Effect of long-term ageing on the rheological properties of rejuvenated asphalt binder”, *Road Materials and Pavement Design*, pp.1-19.
- DeDene, C. D., & You, Z. P., (2014), “The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(2), pp.145-152.
- Dokandari, P. A., Kaya, D., Sengoz, B., & Topal, A., (2017), “Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement”, In *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering (CSEE'17)*, pp. 1-12.
- Epps Martin, M., Zhou, F., Arambula, E., Park, E. S., Chowdhury, A., Kaseer, F., & Glover, C., (2015), “The Effect of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS

- rejuvenation for aged bitumen”, *Construction and Building materials*, 74, pp.83-92.
- Taherkhani, H., & Noorian, F., (2019), “Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent”, *International Journal of Pavement Engineering*, pp.1-11.
- Tenza-Abril, A. J., Saval, J. M., & Cuenca, A. (2014), “Using sewage-sludge ash as filler in bituminous mixes”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04014141.
- Wen, H., Bhusal, S. and Wen, B., (2012), “Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10), pp.1432-1437.
- Xu, G., Yu, Y., Wang, T., Chen, X., & Yang, J., (2019), “Rejuvenating Mechanism of Aged Asphalt with Bio-Rejuvenator from Micro Aspect”, In *CICTP 2019*, pp. 975-986.
- Zamhari, K. A., Hermadi, M., and Fun, C. W., (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., Poulikakos, L., & 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*, 71, pp.538-550.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R., (2012), “Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen”, *Journal of hazardous materials*, 233, pp.254-258.
- Zhang, J., (2010), “Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance”.
- Zhang, R., You, Z., Wang, H., Ye, M., Yap, Y. K., & Si, C., (2019), “The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder”, *Construction and Building Materials*, 196, pp.134-143.
- Engineering (English Edition)*, 5(3), pp.157-168.
- Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S., & 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*, 14(sup2), pp.193-213.
- Oliver, J. W. H., (2011), “The influence of the binder in RAP on recycled asphalt properties”, *Road Materials and Pavement Design*. Taylor & Francis, 2(3), pp. 311–325.
- Ongel, A. and Hugener, M., (2015), “Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen”, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 94, pp. 467–474.
- Pan, P., Kuang, Y., Hu, X., & Zhang, X., (2018), “A comprehensive evaluation of rejuvenator on mechanical properties, durability, and dynamic characteristics of artificially aged asphalt mixture”, *Materials*, 11(9), 1554.
- Sarsam, S. I., & Abdulmajeed, S. M., (2014), “Influence of aging time on asphalt pavement performance”, *Journal of Engineering*, 20(12), pp.1-12.
- Sengul, C. E., Aksoy, A., Iskender, E., & Ozen, H., (2012), “Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance”, *Construction and Building Materials*, 30, pp.139-148.
- Sias Daniel, J., Gibson, N., Tarbox, S., Copeland, A., & Andriescu, A., (2013), “Effect of long-term ageing on RAP mixtures: laboratory evaluation of plant-produced mixtures”, *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup2), pp.173-192.
- Solanki, P., Hossain, Z., Zaman, M., & Adje, D., (2012), “Volumetric and mechanistic characteristics of asphalt mixes containing recycled asphalt pavement”, In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, pp. 3709-3718.
- 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.
- Su, J.F., Qui, E., Schlangen, W.Y.Y., (2015), “Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ

Investigating the Effects of Ageing on the Properties of Hot Mix Asphalt Containing High Content of Reclaimed Asphalt Pavement Content and Waste Cooking Oil

Hasan Taherkhani, Associate Professor, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Meysam Abbasi, M.Sc., Student, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

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

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

In this study the effect of short and long term aging on the properties of recycled asphalt containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) and rejuvenated by different dosages of waste cooking oil has been investigated. The coarse fraction of virgin aggregates was replaced with RAP, and the mixtures were rejuvenated by adding 0, 4, 7 and 10% (by the weight of total binder) of waste engine oil. The mixtures were short and long term aged and the volumetric properties; Marshall stability and flow and weight loss in Cantabro test were evaluated for the unaged and aged mixtures. Results reveal that the mixture containing RAP and without rejuvenation has higher VMA, Marshall Stability, flow and weight loss in Cantabro test than the mixture made of virgin aggregates. The properties decrease with increasing oil content. Short term and long term ageing result in increase of VMA, Marshall Stability and weight loss, and decrease of flow, with higher changes by long term ageing. Evaluation of ageing indices reveals that the effect of ageing increases with increasing oil content.

Keywords: Ageing, Recycled Asphalt Mixture, Waste Cooking Oil, Marshall Stability, Raveling