

## ارزیابی تاثیر پیر شدگی بر روی خواص بتن آسفالتی بازیافتی حاوی جوانساز روغن موتور ضایعاتی

### علمی - پژوهشی

حسن طاهرخانی، دانشیار، گروه عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

جواد نجفی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [taherkhani.hasan@znu.ac.ir](mailto:taherkhani.hasan@znu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

صفحه ۱۲۲-۱۰۵

### چکیده

در این تحقیق، با جایگزینی بخش درشت دانه یک بتن آسفالتی با خرده آسفالت ضایعاتی و افزودن درصدهای مختلف وزنی شامل ۰، ۷، ۱۰٪ (بر حسب وزن کل قیر مخلوط) از روغن موتور ضایعاتی به آن برای جوانسازی قیر پیر شده خرده آسفالت، ویژگی‌های مختلف آن شامل خصوصیات حجمی، استقامت مارشال، روانی، مقاومت کششی و مقاومت خزشی بعد از اعمال پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت مورد ارزیابی قرار گرفته و با حالت بدون پیرشدگی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند نتایج نشان می‌دهند که استقامت مارشال، مقاومت کششی و مقاومت خزشی مخلوطها با افزودن خرده آسفالت ضایعاتی افزایش و با افزایش روغن ضایعاتی کاهش می‌یابد. در مخلوطهای پیر نشده، استقامت مارشال و نسبت مارشال با افزودن روغن تا ۷٪ افزایش و سپس کاهش می‌یابند. اما، مقاومت کششی و خزشی با افزایش روغن کاهش می‌یابند. همچنین، پیرشدگی باعث افزایش استقامت مارشال، نسبت مارشال، مقاومت کششی و مقاومت خزشی و کاهش روانی می‌گردد. میزان تاثیر پیرشدگی بر خصوصیات آسفالت بازیافتی با نوع پیرشدگی و مقدار روغن تغییر می‌کند. تاثیر پیرشدگی بر افزایش نسبت مارشال تا ۷٪ روغن افزایش و سپس کاهش می‌یابد. تاثیر پیرشدگی بر مقاومت کششی با افزایش روغن کاهش می‌یابد. اما، تاثیر بر افزایش مقاومت خزشی با افزایش مقدار روغن افزایش می‌یابد. تاثیر پیرشدگی بر افزایش مقاومت کششی بیشتر از آن بر استقامت مارشال می‌باشد. تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر استقامت مارشال و مقاومت کششی مخلوطهای بازیافتی کمتر از مخلوط کنترل می‌باشد و میزان تاثیر با افزایش روغن کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج بیانگر این است که تاثیر پیرشدگی بر مقاومت خزشی بیشتر از آن بر مقاومت کششی و خصوصیات مارشال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن آسفالتی بازیافتی، پیر شدگی، روغن موتور ضایعاتی، مقاومت خزشی، مقاومت کششی

### ۱-مقدمه

(RAP<sup>1</sup>) گفته می‌شود. دپوی این مصالح در زمین‌های اطراف روسازی‌ها باعث بروز مشکلاتی برای محیط زیست خواهد شد و استفاده مجدد از آن علاوه بر صرفه جویی در مصرف مصالح جدید باعث کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از آسیب‌های زیست محیطی آن خواهد شد. 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

یکی از پر مصرف‌ترین مصالح در ساخت روسازی‌ها در سراسر دنیا بتن آسفالتی گرم می‌باشد. با قرار گرفتن تحت بار ترافیک و عوامل محیطی این مصالح در معرض انواع خرابی‌ها قرار گرفته و نیاز به بهسازی خواهند داشت. در صورتی که شدت و گستردگی خرابی‌ها در روسازی آسفالتی زیاد باشد یکی از گزینه‌ها تراشیدن لایه‌های آسفالتی و جایگزینی آن با مواد جدید می‌باشد. به آسفالت تراشیده شده از لایه‌های آسفالتی روسازی‌ها خرده آسفالت بازیافتی

می‌شود (Mogawer et al., 2013). چن و همکاران ۲۰۱۴ گزارش کردند که افزودن جوانساز مقاومت به شیارشدگی مخلوط‌های حاوی RAP را کاهش می‌دهد (Chen et al., 2014). همچنین، گزارش شده مخلوط‌های ساخته شده با جوان‌کننده‌ها در مقایسه با مخلوط‌های ساخته شده با قیر نرم‌تر مقاومت به شیارشدگی بالایی دارند (Shen, Amirkhanian, and Aune Miller, 2007). 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; Taherkhani and Noorian, 2018)، روغن خوراکی ضایعاتی (Dokandari et al., 2017; Zaumanis et al., 2014; Taherkhani and Noorian, 2018; Taherkhani and Noorian, 2019)، گریس خوراکی ضایعاتی، روغن آلی، عصاره آروماتیک، روغن تال مقطر، (Zaumanis et al., 2014)، روغن روان‌کاری (Zamhari, Hermadi, and Fun, 2009)، روغن نفتتیک، روغن پارافین، عصاره آروماتیک، روغن تال و اسید اولئیک (Ali et al., 2016; Hong et al., 2020) و روغن های 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 گزینه‌ها روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. در کشورهای مختلف صدها میلیون 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 شوند (Kamaruddin et al., 2014). تخمین زده شده است که ۴۵ میلیون تن روغن موتور ضایعاتی (WEO<sup>2</sup>) هر ساله در جهان تولید می‌شود و تنها ۴۰ 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

است. به کارگیری خرده آسفالت ضایعاتی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی جدید باعث می‌شود از منابع طبیعی و بکر کمتری استفاده شده و در هزینه و انرژی مصرف شده در فرایند تولید و حمل آنها صرفه جویی شود. اولین استفاده از آسفالت بازیافتی 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). 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, 2016; Dhasmana et al., 2019). به همین دلیل، مقدار خرده آسفالت بازیافتی در یک مخلوط آسفالتی جدید به مقادیر مشخصی محدود می‌شود که معمولاً ۱۰ تا ۲۵٪ وزن مصالح سنگی می‌باشد (Zargar et al., 2012). در مواردی که درصد‌های بالاتری از خرده آسفالت استفاده گردد، برای جبران نواقص ایجاد شده می‌توان از قیر نرم‌تر به عنوان بخشی یا کل قیر بکر و یا از عوامل جوانساز استفاده نمود. 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 نمی‌باشد. یکی از راه‌های مناسب دیگر برای غلبه بر ضعف آسفالت بازیافتی، استفاده از عوامل جوان‌ساز در مخلوط‌هایی است که حاوی درصد بالایی از خرده آسفالت ضایعاتی هستند. استفاده از جوان‌سازها باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی قیر پیرشده می‌گردد (Martin et al., 2015; Dhasmana et al., 2019). جوان‌ساز باعث می‌شود خواص قیر پیرشده به خواص اولیه آن بازگردد (DeDene and You, 2014). محققان گزارش کردند که افزودن عوامل جوان‌کننده دماهای اختلاط و تراکم را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Romera et al., 2006). باید توجه داشت که نوع جوان‌کننده اثر قابل توجهی بر روی درجه 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 می‌شود که به اثر پخش جوانساز در قیر سخت نسبت داده

همکارانش در سال 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 ۴۰ 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 پیرشده RAP را جبران نماید. علاوه بر آن، 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 اثر روغن موتور و خوراکی ضایعاتی را بر روی 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 ۵/۴ 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 ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ 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. با استفاده از WEO و WCO به عنوان جوانساز در مخلوط‌های بازیافتی می‌توان مقدار RAP استفاده شده در مخلوط را افزایش داد (Dokandari et al., 2017). مخلوط آسفالتی باید از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. علیرغم انجام مطالعات مختلف بر روی اثرات استفاده از روغن موتور 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. بنابراین، هدف این تحقیق بررسی تأثیر پیر شدگی بر خصوصیات بتن آسفالتی بازیافتی حاوی درصد‌های مختلف جوانساز می‌باشد. بخش درشت دانه بتن آسفالتی با آسفالت ضایعاتی جایگزین گردیده و خواص مارشال، مقاومت کششی و خزشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

گزینه مناسبی برای مقابله با معضلات زیست محیطی آنها می‌باشد. در همین راستا، مهندسان روسازی بر آن شدند که از روغن‌های ضایعاتی به عنوان مصالح ساخت مخلوط آسفالتی استفاده کنند. از آنجایی که مصالح خرده آسفالت بازیافتی در طول عمر خود دچار پیری شده و بیشتر بخش روغنی خود را از دست می‌دهند، بنابراین، استفاده از جوان‌کننده‌های بر پایه روغن از جمله روغن‌های ضایعاتی برای جبران بخش روغنی مصالح خرده آسفالت ضروری به نظر می‌رسد. 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. ددنه و یو عملکرد قیرها و مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی جوان شده با WEO را مورد مطالعه قرار دادند (DeDene and You, 2014). نتایج نشان داد که روغن موتور ضایعاتی توانایی بازگرداندن خواص شیمیایی 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. زائومانیس و همکارانش در سال ۲۰۱۴ مطالعاتی را بر روی ۶ جوانساز شامل ۴ 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 بالا و 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 (Zaumanis, Mallick, and Frank, 2014, 2015; Zaumanis et al., 2014, 2015). ژیا و

## ۲- مواد مورد استفاده در تحقیق

مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد. مصالح خرده آسفالت استفاده شده در این تحقیق از ضایعات حاصل از تراش رویه آسفالتی راه زنجان به میانه تهیه گردید. درصد قیر مصالح RAP با استفاده از روش تجزیه آسفالت به وسیله سانتریفورژ مطابق با استاندارد ASTM-D2172 در آزمایشگاه به دست آمد. در این آزمایش از بنزین به عنوان حلال استفاده شد. پس از جداسازی قیر از مصالح سنگی، درصد قیر RAP ۳/۷۷٪ به دست آمد و دانه‌بندی مصالح سنگی RAP (مصالح بازیابی شده) نیز تعیین گردید که نتایج آن در شکل ۱ ارائه شده است.

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل قیر و مصالح سنگی بکر، خرده آسفالت ضایعاتی و روغن موتور ضایعاتی می‌باشند. مصالح سنگی بکر مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیلیسی بوده که از یک کارخانه آسفالت در شهر زنجان تهیه گردید. برخی از مشخصات فنی مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند. جدول ۲ نیز مشخصات مربوط به چگالی و جذب آب مصالح سنگی بکر را نشان می‌دهد. قیر استفاده‌شده در این تحقیق از نوع قیر درجه نفوذی ۷۰-۶۰ بوده که از شرکت قیر آکام قم تهیه گردیده است. جدول ۳

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی بکر

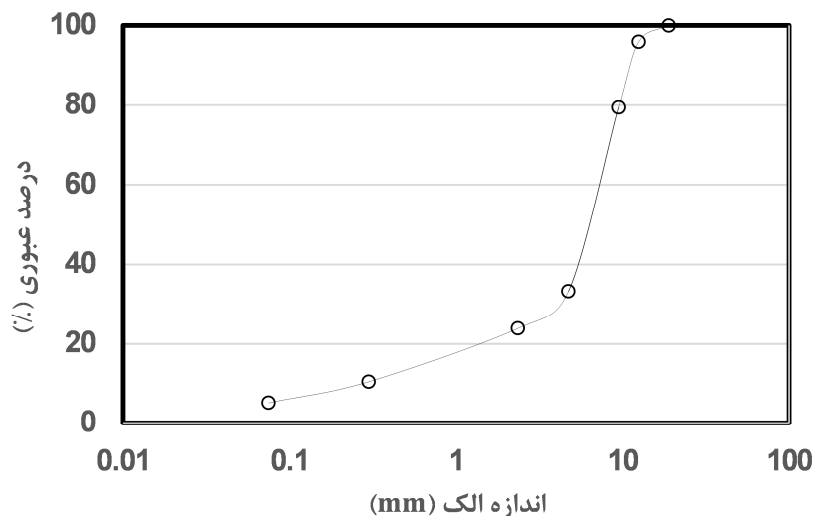
مشخصه	نتایج آزمایش		حدود آیین‌نامه	
	درشت دانه	ریزدانه	فیلر	درشت دانه
ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)	-	۵۸	-	-
نوع دانه‌بندی	B	-	-	-
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (AASHTO-T96)	۵۰۰	-	-	-
درصد سایش	۲۲	-	-	حداکثر ۲۵
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (ASTM-D5821)	۹۴	-	-	حداقل ۹۵
در دو جبهه	۹۰	-	-	حداقل ۹۰
درصد اندود قیر به مصالح سنگی (ASTM-D1664)	بیش از ۹۵ درصد			
درصد فضای خالی (FAA) (ASTM-D1252)	رد شده از الک نمرة ۸	۴۵/۲	-	حداقل ۴۵
درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO <sub>2</sub> )	۵۵	-	-	-
ضریب نرمی ماسه (AASHTO-M6)	۳/۷۰	-	-	-
درصد تورق (BS-812)	۱۱	-	-	حداکثر ۲۵
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)	۰/۷	۰/۹	-	حداکثر ۸

جدول ۲. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

مشخصه	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		جذب آب (%)
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸	۲/۷۲	۲/۶۰	۱/۸
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲/۷۸	۲/۶۰	۲/۵
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲/۷۹	-	-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی G <sub>sb</sub> (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۶۱	-	-

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق

مشخصات	حدود	نتایج	روش آزمایش	توضیحات
درجه نفوذ	۶۰-۷۰	۶۶	ASTM-D5	۲۵ درجه سانتی گراد، ۰/۱ میلی متر
نقطه نرمی	۵۶-۴۹	۴۹	ASTM-D36	درجه سانتی گراد
کشش پذیری	+۱۰۰	>۱۰۰	ASTM-D113	۲۵ درجه سانتی گراد، سانتی متر
حلالیت در تری کلرواتیلن	حداقل ۹۹	۹۹/۸	ASTM-D2042	درصد
وزن مخصوص	۱/۰۶-۱/۰۱	۱/۰۱۸	ASTM-D70	۲۵ درجه سانتی گراد
درجه اشتعال	حداقل ۲۲۰	۳۱۵	ASTM-D92	درجه سانتی گراد
نسبت افت درجه نفوذ بعد از حرارت دهی	حداکثر ۲۰	۸/۹	ASTM-D5&D6	درصد
افت وزنی	حداکثر ۰/۲	۰/۰۹	ASTM-D6	درصد وزنی



شکل ۱. دانه بندی مصالح RAP



شکل ۲. روغن موتور ضایعاتی استفاده شده

در این تحقیق جهت جوانسازی قیر پیرشده آسفالت بازیافتی از روغن موتور ضایعاتی در مخلوطهای آسفالتی حاوی خرده آسفالت بازیافتی استفاده گردید. این ماده از تعمیرگاهی در شهر زنجان تهیه گردید. بعد از جدا کردن ناخالصیها با استفاده از صافی از آن برای جوانسازی استفاده گردید. شکل ۲ روغن موتور استفاده شده در تحقیق را نشان می دهد.

### ۳- طرح اختلاط، برنامه آزمایش‌ها و روش ساخت نمونه‌ها

مارشال ریخته شده و با استفاده از چکش مارشال اتوماتیک با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، متراکم شدند. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها 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 یکنواخت سازی 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 آن، ولی با دمایی معادل ۸۵ درجه سلسیوس و برای مدت ۱۲۰ ساعت قرار گرفتند.



شکل ۳. سنگدانه های بازیافتی

### ۴- آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها

آزمایش‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌ها شامل تعیین وزن مخصوص واقعی مخلوط متراکم، وزن مخصوص حداکثر نظری، استقامت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم و خزش دینامیکی مختلف می‌باشند. وزن مخصوص واقعی مخلوط‌های آسفالتی متراکم مطابق با استاندارد AASHTO T166 تعیین گردید. برای تعیین درصد فضای خالی علاوه بر وزن مخصوص واقعی باید حداکثر وزن مخصوص تئوری نیز تعیین گردد که برای تعیین آن از استاندارد ASTM D2041 استفاده گردید. با تعیین وزن مخصوص واقعی ( $G_{mb}$ ) و حداکثر وزن مخصوص نظری ( $G_{mm}$ )، درصد فضای خالی مخلوط‌ها ( $V_a$ ) برای تمامی مخلوط‌ها با استفاده محاسبه گردید. آزمایش استقامت مارشال به منظور تعیین خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی مطابق با روش استاندارد ASTM D 1559 انجام گرفت. مطابق با این روش، ابتدا

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  $V$  نشان داده می‌شود. مخلوط دیگر حاوی خرده آسفالت ضایعاتی بوده که جایگزین بخش درشت دانه (مانده بر روی الک  $4/75$  میلیمتر) بتن آسفالتی گردیده‌اند. شکل ۳ سنگدانه‌های RAP را که مانده بر روی الکهای  $12.5$  و  $4.75$  میلی‌متر می‌باشند را نشان می‌دهد. این مخلوط با  $E_0$  نمایش داده می‌شود. سه مخلوط دیگر شامل درشت‌دانه آسفالت ضایعاتی بوده و به آن‌ها به ترتیب  $E_1$ ،  $E_2$  و  $E_3$  در این مقاله به ترتیب با  $E_4$ ،  $E_7$  و  $E_{10}$  نشان داده می‌شوند. درصد‌های استفاده شده بر اساس مقادیر به کار رفته در تحقیقات قبلی انتخاب گردیدند (Jia et al., 2015; Dokandari et al., 2017; Taherkhani and Noorian, 2018)، که در آنها میزان RAP در محدوده مقادیر استفاده شده در این تحقیق می‌باشد. این محدوده از مقادیر روغن به این دلیل انتخاب شد تا تغییرات خصوصیات مخلوطها با آن بررسی گردد. مقادیر دانه بندی مورد استفاده برای مخلوط‌ها دانه‌بندی شماره ۴ در نشریه ۲۳۴ برای بتن آسفالتی می‌باشد. مخلوط‌ها به روش مارشال طرح شده و مقدار قیر بهینه آن‌ها تعیین گردید. برای ساخت مخلوط کنترل، به منظور خشک شدن مصالح و رسیدن به دمای مورد نظر، سنگدانه‌های بکر به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $170$  درجه سانتی‌گراد در گرمخانه قرار گرفتند و قیر نیز تا دمای  $150$  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  $1/5$  ساعت در دمای  $150$  درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و در مخلوط‌های بازیافتی حاوی جوان کننده، ابتدا روغن‌های ضایعاتی 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 تحقیقات قبلی انجام گرفت (Veeraragavan, 2016). در نهایت مخلوط‌ها درون قالب

$$S_t = \frac{2000P}{\pi D t} \quad (2)$$

که در آن،  $S_t$  مقاومت کششی (کیلوپاسگال)،  $P$  حداکثر بار  $(N)$ ،  $t$  ضخامت نمونه (میلی‌متر) و  $D$  قطر نمونه (میلی‌متر) می‌باشند. شیارشدگی به عنوان یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی شناخته شده است. شیارشدگی لایه آسفالتی مهم‌ترین تاثیر را در شیارشدگی کل روسازی دارد (Khodaii and Mehrara 2009). آزمایش‌های بسیاری جهت تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی از جمله خزش استاتیکی، خزش دینامیکی و شیار شدگی رد چرخ استفاده می‌شود. در این پژوهش برای مقایسه مقاومت مخلوط‌ها در برابر تغییرشکل‌های دائمی از روش خزش دینامیکی استفاده گردیده است. جهت انجام آزمایش از دستگاه UTM ساخت شرکت اینفراست آلمان استفاده گردید. دستگاه UTM با اعمال بار محوری تکرار شونده بر روی نمونه‌های آسفالتی، تغییرشکل‌های عمودی را اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه شامل محفظه کنترل دما برای رساندن دمای نمونه به دمای مورد نیاز آزمایش و کنترل دمای آن در طول بارگذاری است و سیستم بارگذاری نیز داخل این محفظه قرار گرفته است. همچنین، یک سیستم رایانه‌ای به دستگاه UTM متصل است که داده‌های ورودی و خروجی توسط آن کنترل می‌گردند. داده‌های ورودی در این دستگاه، شامل ابعاد نمونه (قطر و ارتفاع)، مقدار و زمان پیش بارگذاری، مقدار تنش تماسی، تنش انحرافی، فرکانس اعمال تنش، تعداد سیکل بارگذاری و دمای آزمایش است، که مطابق جدول ۴ به دستگاه اعمال شده است.

نمونه‌های استوانه‌ای شکل به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در حمام آب گرم با درجه حرارت  $60 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، تا به دمای مورد نظر برسند. سپس نمونه از حمام آب خارج و در قسمت پایینی فک شکست قرار داده شد و تحت بارگذاری با نرخ ثابت  $50/8$  میلی‌متر در دقیقه قرار گرفت یکبار به حداکثر رسیده و کاهش بار در عقربه مشاهده شود. در نهایت، بیشترین نیروی لازم برای گسیخته شدن نمونه به عنوان استقامت مارشال و تغییر شکل قطری در لحظه شکست به عنوان روانی ثبت گردید. برای انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، نمونه‌هایی به قطر  $101$  میلی‌متر و ضخامت  $63/5 \pm 2/5$  میلی‌متر با درصد فضای خالی حدود  $4\%$  ساخته شدند. پس از خارج نمودن نمونه‌ها از قالب، به مدت  $24 \pm 3$  ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. پس از پایان دوره عمل‌آوری نمونه‌ها توسط ورق پلاستیکی پوشانده شدند. سپس به مدت  $2$  ساعت  $10 \pm$  دقیقه در حمام آب  $25 \pm 0/5$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در دمای  $25$  درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. بدین صورت که نمونه‌ها از حمام آب خارج شده و بین نوارهای بارگذاری فولادی قرار داده شدند. بعد از آن، مجموعه نمونه و نوارهای بارگذاری، بین صفحات بارگذاری دستگاه آزمایش مارشال قرار گرفتند و بار از طریق جابجایی صفحه بارگذاری ماشین آزمایش، با سرعت ثابت  $50$  میلی‌متر در دقیقه، در امتداد قطر به نمونه اعمال گردید. حداکثر بار فشاری نمایش داده شده بر روی گیج ثبت گردیده و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۲ بدست آمد.

جدول ۴. مشخصات ورودی به دستگاه خزش

تنش (کیلوپاسگال)	فرکانس (هرتز)	شکل بارگذاری	زمان بارگذاری (ثانیه)	زمان استراحت (ثانیه)	تعداد بار اعمالی	دمای آزمایش (سانتی‌گراد)
۳۰۰	۱	مربعی	$0/5 \pm 0/05$	$0/5 \pm 0/05$	۱۰۰۰۰	۴۰

## ۵- نتایج و بحث

فضای خالی کمتر کارایی بهتری داشته و مقاومت کمتری در برابر انرژی تراکمی خواهند داشت. علاوه بر این درصد فضای خالی مخلوط‌ها تاثیر بسیار مهمی بر عملکرد مخلوط‌های شامل

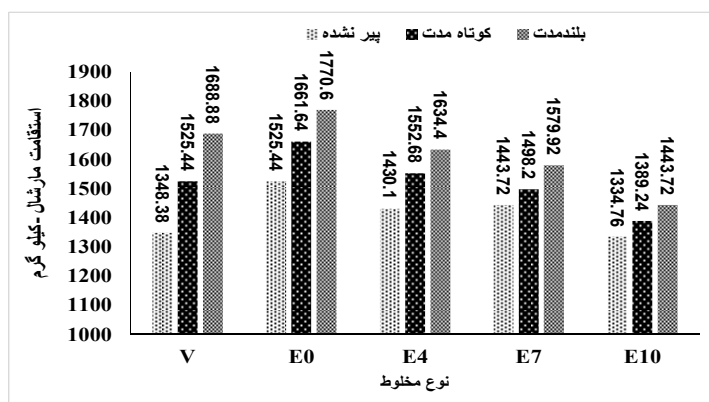
مقدار قیر بهینه و درصد فضای خالی مخلوط‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. درصد فضای مخلوط‌ها نشان دهنده کارایی مخلوط‌ها می‌باشد. مخلوط‌های حاوی درصد

سنگدانه‌ها باشد. نتایج مربوط به مخلوط‌ها در حالات مختلف پیرشدگی نشان دهنده افزایش استقامت مارشال با اعمال پیر شدگی است که مقدار آن برای پیر شدگی بلند مدت بیشتر از پیرشدگی کوتاه مدت است. با اعمال پیرشدگی بر روی مخلوط‌ها، علاوه بر اکسیداسیون، ترکیبات سبک قیر بکر و روغن از دست رفته و باعث سخت‌تر شدن قیر می‌گردد. به منظور بررسی تاثیر پیر شدگی بر استقامت مارشال مخلوط‌های مختلف شاخص پیرشدگی مخلوط‌ها با تقسیم مقدار استقامت بعد از پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت به استقامت مارشال مخلوط پیر نشده محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد. همانگونه که مشاهده می‌گردد شاخص پیر شدگی بلند مدت بیش از شاخص پیر شدگی کوتاه مدت است که نشان دهنده اثر بیشتر پیر شدگی بلند مدت بر افزایش استقامت است. همچنین، با جایگزینی خرده آسفالت با بخش درشت دانه مصالح سنگی تاثیر پیر شدگی کاهش می‌یابد و این تاثیر با افزایش مقدار روغن کاهش می‌یابد.

جدول ۵. مقدار قیر بهینه و درصد فضای خالی مخلوطها

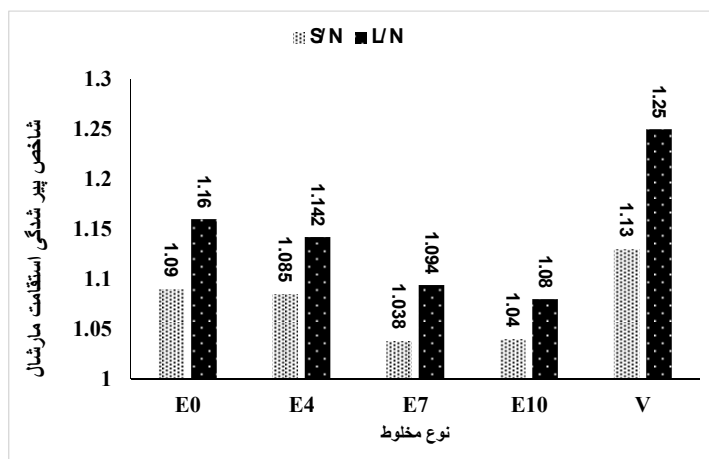
نوع مخلوط	درصد قیر بهینه %	درصد فضای خالی مخلوط %
V	۵/۸	۳/۸۶
E0	۶/۲	۴/۰۵
E4	۶	۳/۹
E7	۶	۳/۸
E10	۵/۹	۳/۹۵

دوام، سختی، مقاومت به ترک خوردگی و شیار شدگی دارد، که به همین دلیل در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی بدون جوان‌ساز درصد قیر بهینه بالاتری نسبت به مخلوط کنترلی دارد که دلیل آن کاهش کارایی مخلوط بازیافتی به دلیل وجود قیر پیر شده می‌باشد و برای تامین فضای خالی مناسب نیاز به قیر بیشتری دارد. همچنین، ملاحظه می‌گردد که با افزایش روغن موتور مقدار قیر بهینه کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش کارایی قیر آسفالت بازیافتی به دلیل اختلاط با جوان‌ساز است که با قیر کمتری می‌توان به تراکم لازم دست یافت شکل ۴ نتایج مربوط به استقامت مارشال مخلوط‌های مختلف را در حالت‌های پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و بلند مدت نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که استقامت مارشال مخلوط حاوی خرده آسفالت ضایعاتی و بدون جوان‌کننده E0 در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و بلند مدت از مخلوط کنترل V بیشتر است که این موضوع به دلیل سختی قیر موجود در خرده آسفالت ضایعاتی است. همچنین، مطابق با انتظار، نتایج بیانگر کاهش استقامت مارشال با افزودن روغن موتور می‌باشند، که دلیل آن افزایش نرم شدگی قیر با افزودن روغن موتور می‌باشد. برای حالت پیر نشده افزودن ۱۰٪ روغن موتور باعث می‌شود تا آسفالت بازیافتی دارای استقامتی مشابه مخلوط کنترل باشد. همچنین، مشاهده می‌گردد که برای مخلوط پیر نشده استقامت مارشال مخلوط حاوی ۷٪ روغن بیشتر از آن برای مخلوط‌های حاوی ۴٪ و ۱۰٪ روغن است. این موضوع می‌تواند به دلیل نفوذ بیشتر روغن در قیر پیر شده آسفالت ضایعاتی و مشارکت آنها در ایجاد چسبندگی بیشتر در



شکل ۴. استقامت مارشال مخلوط‌های مختلف در حالات مختلف پیر شدگی

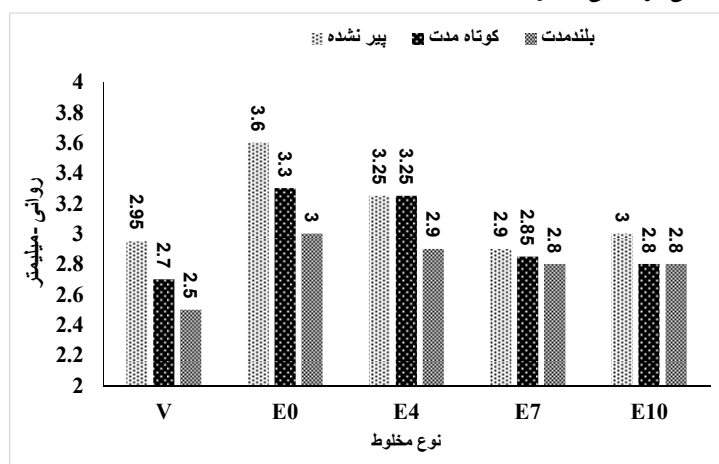




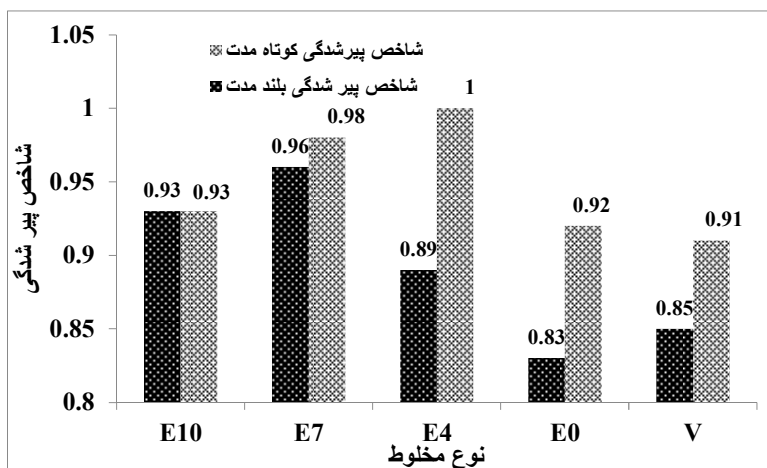
شکل ۵. شاخص پیر شدگی مخلوط‌های مختلف برای استقامت مارشال

یکسان نیست. به همین منظور، شاخص پیر شدگی برای مخلوط‌های مختلف با تقسیم میزان روانی بعد از اعمال پیر شدگی به روانی مخلوط قبل از اعمال پیر شدگی محاسبه گردید که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، تاثیر پیر شدگی کوتاه مدت در مخلوط E<sub>0</sub> از مخلوط کنترل کمتر است اما تاثیر پیر شدگی بلند مدت در کاهش روانی در مخلوط E<sub>0</sub> بیشتر از مخلوط کنترل است. همچنین، با افزایش روغن به میزان ۴٪ به مخلوط بازیافتی شاخص پیر شدگی کوتاه مدت و تا ۷٪ شاخص پیر شدگی بلند مدت افزایش می‌یابد که نشان دهنده این است که اثر پیر شدگی در کاهش روانی کم می‌شود. اما، با افزایش روغن بیش از ۴ و ۷٪، به ترتیب برای پیر شدگی کوتاه و بلند مدت، پیر شدگی تاثیر بیشتری بر کاهش روانی خواهد داشت.

شکل ۶ روانی مخلوط‌های مختلف را در حالات مختلف پیر شدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط کنترل دارای کمترین مقدار روانی است. همچنین، مقدار روانی با افزایش مقدار روغن کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان افزایش کارایی و افزایش تراکم و همچنین کاهش پیوستگی در قیر در اثر افزودن روغن دانست که باعث می‌شود میزان کشش کمتری را در لحظه شکست تحمل نماید. با اینحال، مشابه نتایج استقامت مارشال، برای مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی پیر نشده، میزان روانی در مخلوط حاوی ۷٪ روغن کمتر از آن برای مخلوط‌های حاوی ۴ و ۱۰٪ روغن است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با اعمال پیر شدگی نیز روانی کاهش می‌یابد که به دلیل سخت‌تر شدن قیر در اثر پیر شدگی است و میزان تاثیر پیر شدگی بلند مدت بیشتر از پیر شدگی کوتاه مدت است. با اینحال، میزان تاثیر پیر شدگی بر روانی مخلوط‌های مختلف



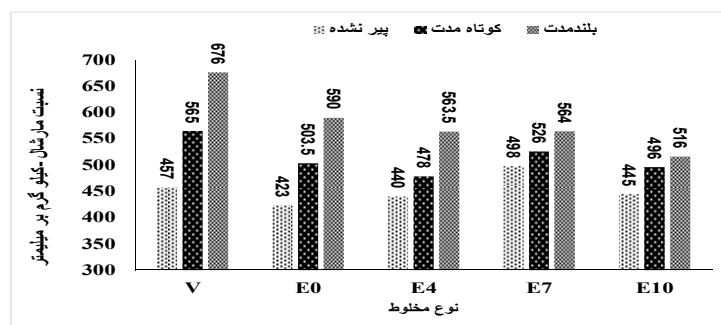
شکل ۶. روانی مخلوط‌های مختلف در حالات مختلف پیر شدگی



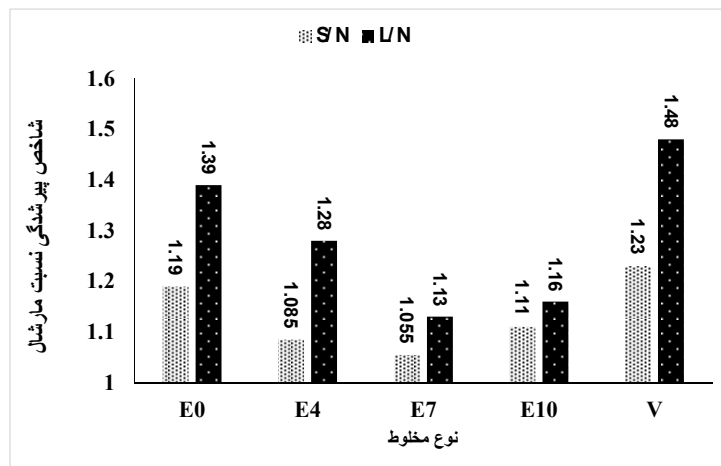
شکل ۷. شاخص پیر شدگی مخلوطهای مختلف برای روانی مارشال

مارشال مخلوطهای حاوی روغن موتور کمتر از مخلوط کنترل و مخلوط حاوی خرده آسفالت بدون جوان کننده است و این اثر پیر شدگی با افزایش روغن کاهش می‌یابد. به طوری که مخلوط بازیافتی حاوی ۱۰٪ روغن موتور کمترین تاثیر را از پیر شدگی داشته است. به منظور بررسی تاثیر پیر شدگی بر روی نسبت مارشال مخلوطها، شاخص پیر شدگی با تقسیم نسبت مارشال بعد از پیر شدگی کوتاه مدت و بلند مدت به نسبت مارشال مخلوط پیر نشده محاسبه گردید که نتایج در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مخلوطهای بازیافتی دارای شاخص پیر شدگی کمتری از مخلوط کنترل بوده و میزان این شاخص با افزایش روغن تا ۷٪ کاهش می‌یابد و بعد از آن مجدداً افزایش می‌یابد. با افزایش روغن بیش از مقداری که برای نفوذ در قیرهای اکسیده خرده آسفالت و مشارکت دادن آن در اندود سنگدانه‌ها نیاز است، روغن اضافی در مخلوط در شرایط پیر شدگی راحت‌تر تبخیر شده و خصوصیات مقاومتی مخلوط بیشتر تاثیر می‌پذیرد.

با تقسیم استقامت مارشال به روانی نسبت مارشال برای مخلوطهای مختلف محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت مارشال به عنوان شاخصی برای مقاومت مخلوطهای آسفالتی به تغییر شکل استفاده می‌گردد (Ameri et al., 2013). همانگونه که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد، با جایگزینی خرده آسفالت به جای بخش درشت دانه مصالح سنگی و بدون افزودن روغن موتور نسبت مارشال کاهش می‌یابد که این کاهش بیشتر متاثر از افزایش روانی در مخلوط حاوی خرده آسفالت می‌باشد. همچنین، در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در مخلوطهای حاوی خرده آسفالت، در حالت پیر نشده و پیر شدگی کوتاه مدت، مقدار نسبت مارشال با افزایش روغن تا ۷٪ افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. افزایش روغن تا حد معینی می‌تواند در قیرهای اکسیده خرده آسفالت نفوذ کرده و آنها را در اندود سنگدانه‌ها مشارکت دهد. اما اگر روغن بیش از اندازه باشد باعث نرم‌تر شدن قیر مخلوط شده و چسبندگی آن را کاهش می‌دهد. با مشاهده شکل ۸ می‌توان استنباط نمود که اثر پیر شدگی بر روی نسبت



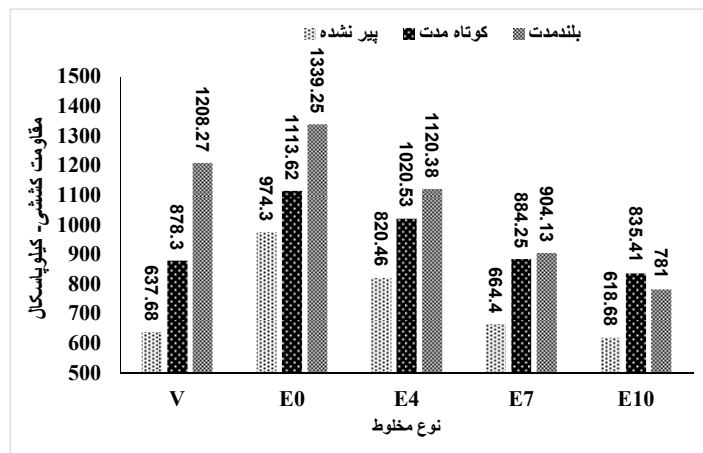
شکل ۸. نسبت مارشال مخلوطهای مختلف



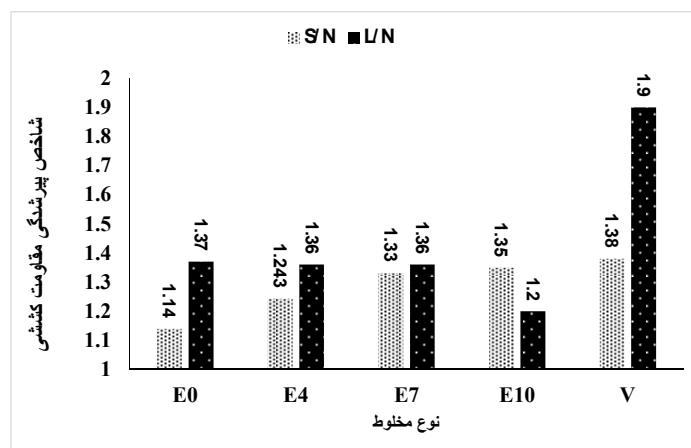
شکل ۹. شاخص پیر شدگی مخلوطهای مختلف برای استقامت مارشال

نشان دهنده این است که مشابه نتایج نسبت مارشال و استقامت مارشال، تاثیر پیرشدگی بر مخلوطهای حاوی روغن موتور کمتر از مخلوط کنترل است. به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی بر مقاومت کششی مخلوطهای مختلف شاخص پیر شدگی برای مقاومت کششی مخلوطها در دو حالت پیر شدگی کوتاه مدت و بلند مدت محاسبه گردید که مقادیر آنها نسبت مقاومت کششی بعد از اعمال پیر شدگی کوتاه مدت یا بلند مدت به مقاومت کششی مخلوط پیر نشده می باشد. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، مخلوط کنترل دارای بیشترین شاخص پیر شدگی است به طوری که بعد از اعمال پیر شدگی بلند مدت مقاومت کششی تا حدود دو برابر افزایش می یابد. نتایج همچنین بیانگر این است که به غیر از مخلوطی که حاوی ۱۰٪ جوان کننده می باشد در بقیه مخلوطها پیر شدگی بلند مدت تاثیر بیشتری از پیر شدگی کوتاه مدت بر افزایش مقاومت کششی دارد ولی با افزایش مقدار جوان کننده تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر افزایش مقاومت کششی کاهش می یابد. دلیل این موضوع فرصت یافتن روغن در نفوذ به قیر اکسیده خرده آسفالت بازیافتی در طول مدت اعمال شرایط پیر شدگی بلند مدت است.

مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی به مقاومت آنها در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی ارتباط می یابد و آگاهی از آن دارای اهمیت می باشد. شکل ۱۰ مقاومت کششی مخلوطهای مختلف مورد مطالعه در این تحقیق را در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و بلند مدت نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می گردد، مقاومت کششی مخلوط حاوی خرده آسفالت ضایعاتی و بدون جوان کننده بیشتر از مخلوط کنترل است که دلیل آن افزایش سختی مخلوط در اثر وجود قیر پیر شده در خرده آسفالت ضایعاتی است که باعث می شود مخلوط نیروی عمودی بیشتری را تا لحظه شکست تحمل نماید. اما، مقدار مقاومت کششی با افزایش روغن موتور کاهش می یابد که به دلیل نرم شوندگی قیر مخلوطها در اثر افزایش روغن موتور می باشد. یکی از اهداف استفاده از جوان کننده ها در مخلوطهای بازیافتی کم کردن پتانسیل ترک خوردگی در مخلوط می باشد. با هدف رسیدن به مخلوطی با مقاومت کششی برابر یا نزدیک به مخلوط کنترل، می توان ملاحظه نمود که مخلوط حاوی ۷٪ روغن موتور در حالت پیر نشده و پیر شدگی کوتاه مدت مقاومت کششی خیلی نزدیکی به مخلوط کنترل دارد و می توان آن مقدار را برای استفاده توصیه نمود. اما، مخلوط حاوی ۷٪ روغن موتور بعد از اعمال پیر شدگی بلند مدت مقاومت کششی کمتری از مخلوط کنترل دارد که



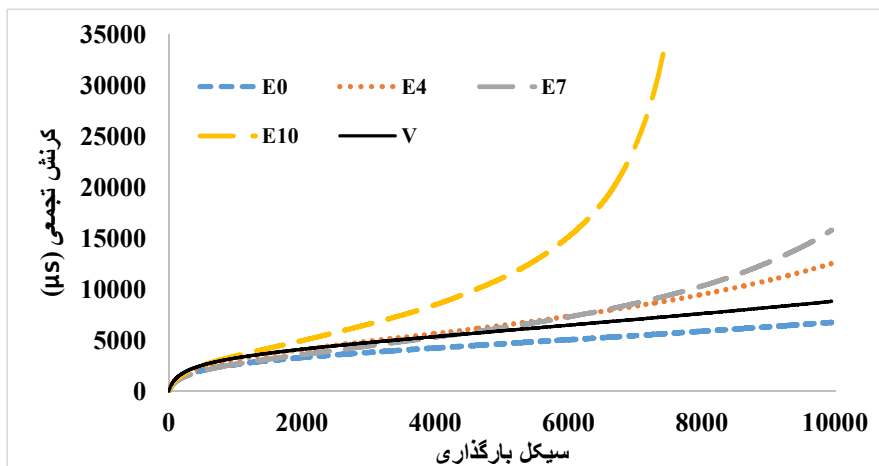
شکل ۱۰. مقاومت کششی مخلوطها در شرایط مختلف پیر شدگی



شکل ۱۱. شاخص پیر شدگی مخلوطهای مختلف برای مقاومت کششی

افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲، ملاحظه می‌گردد که با وجودی که مخلوط کنترل و مخلوط حاوی خرده آسفالت و بدون جوان کننده بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری وارد ناحیه سوم خزش نگردیده‌اند، مخلوطهای حاوی روغن موتور از ناحیه دوم خزش عبور کرده و وارد ناحیه سوم گردیده‌اند. برای داشتن مخلوطی با مقاومت خزشی برابر با مخلوط کنترل به نظر می‌رسد مقدار جوان کننده کمتر از ۴٪ مورد نیاز باشد. همچنین، ملاحظه می‌گردد که مقدار کاهش مقاومت خزشی با افزایش روغن به شدت افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل نفوذ بیشتر روغن به قیر پیر شده موجود در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی باشد که آنها را نرم نموده و باعث می‌گردد مقاومت به تغییر شکل مخلوطها به شدت کاهش یابد.

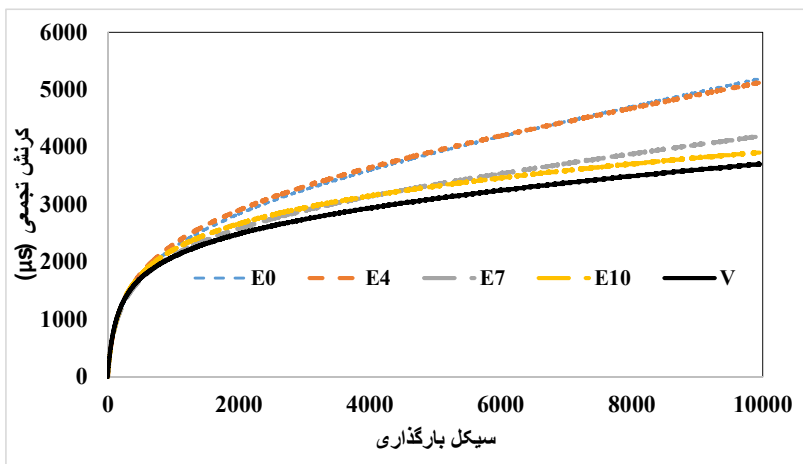
شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، به ترتیب، نتایج آزمایش خزش دینامیکی را برای مخلوطهای مختلف بدون پیر شدگی، پیر شدگی کوتاه مدت و پیر شدگی بلند مدت نشان می‌دهند. در این شکلها میزان کرنش تجمعی عمودی نمونه‌ها بر حسب تعداد سیکل‌های بارگذاری نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد، مقاومت خزشی مخلوط حاوی خرده آسفالت بازیافتی و بدون جوان کننده بیشتر از مخلوط کنترل می‌باشد که دلیل آن وجود قیر پیر شده با سختی بیشتر در خرده آسفالت ضایعاتی می‌باشد. همچنین، با افزایش میزان جوان کننده مقدار مقاومت خزشی کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش نرم‌کنندگی روغن موتور با افزایش مقدار آن در مخلوط می‌باشد. اما، نرخ کاهش مقاومت خزشی با افزایش روغن



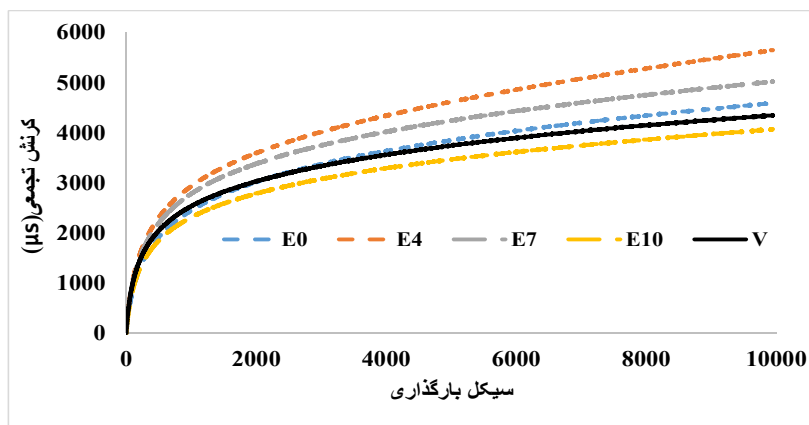
شکل ۱۲. منحنی خزش مخلوطهای پیر نشده

این است که بعد از اعمال شرایط پیر شدگی بلند مدت مقدار مقاومت خزشی نسبت به اعمال پیر شدگی کوتاه مدت افزایش کمتری داشته است. این موضوع به دلیل آن است که در شرایط پیر شدگی بلند مدت که مدت ۱۲۰ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد نگهداری می‌شوند، روغن فرصت نفوذ به داخل قیر پیر شده خرده آسفالت بازیافتی را یافته و باعث نرم‌تر شدن مخلوط می‌گردد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که شاخص پیر شدگی با افزایش روغن موتور کاهش می‌یابد که نشان دهنده این است که با افزایش روغن موتور تاثیر پیر شدگی بر افزایش مقاومت خزشی بیشتر است که به دلیل از دست دادن بیشتر مواد فرار در روغن در شرایط پیر شدگی با افزایش مقدار روغن است. به طوری که در مخلوط حاوی ۱۰٪ روغن میزان کرنش تجمعی به حدود یک پنجم کرنش تجمعی قبل از پیر شدگی می‌رسد. مقایسه شاخص پیر شدگی مخلوط کنترل و مخلوط بازیافتی E0 نشان می‌دهد که تاثیر شرایط پیر شدگی کوتاه مدت بر روی مخلوط کنترل بیشتر از مخلوط بازیافتی است که به دلیل تاثیر بیشتر شرایط پیر شدگی به اکسیداسیون و از دست رفتن مواد فرار در قیر بکر نسبت به قیر پیر شده در خرده آسفالت موجود در آسفالت بازیافتی است. اما، شرایط پیر شدگی بلند مدت باعث شده که افزایش مقاومت خزشی در مخلوط بازیافتی بیشتر از آن در مخلوط کنترل گردد. دلیلی که برای این نتیجه می‌توان ارایه داد زیادتیر شدن فضای خالی در نمونه‌های کنترلی است که در شرایط پیر شدگی بلند مدت قرار گرفتند. فضای خالی بعد از شرایط پیر شدگی بلند مدت در مخلوط کنترل بیشتر از مخلوط بازیافتی افزایش یافت.

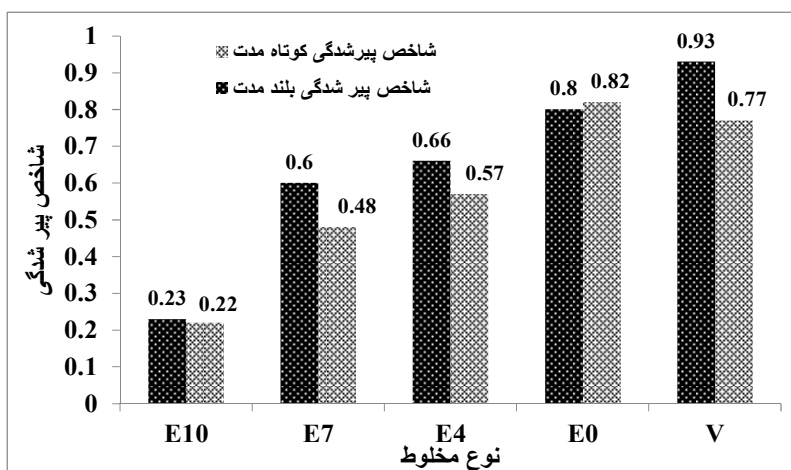
مقایسه شکل ۱۲ با شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که پیر شدگی باعث افزایش مقاومت خزشی مخلوط‌ها گردیده است. این موضوع به دلیل اکسیداسیون و تبخیر مواد فرار قیر و روغن در مخلوط‌ها در شرایط پیر شدگی می‌باشد که منجر به سخت شدن مخلوط می‌شود. همانگونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد، بعد از اعمال پیر شدگی کوتاه مدت مخلوط کنترل بیشترین مقاومت خزشی را داشته و بعد از آن به ترتیب مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت و ۷، ۱۰، ۴ و ۰٪ جوان‌کننده قرار می‌گیرند. این موضوع به این دلیل است که شرایط پیر شدگی تاثیر بیشتری بر روی از دست دادن ترکیبات سبک قیر و روغن موتور می‌گردد. همچنین، نتایج بیانگر این است که پیر شدگی کوتاه مدت کمترین تاثیر را بر مخلوط حاوی خرده آسفالت و بدون جوان‌کننده داشته است. نتایج آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌ها بعد از اعمال پیر شدگی بلند مدت در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با اعمال شرایط پیر شدگی بلند مدت، بیشترین مقاومت خزشی مربوط به مخلوط حاوی ۱۰٪ روغن بوده و بعد از آن مخلوط کنترل، مخلوط‌های بازیافتی حاوی ۰، ۷ و ۴٪ روغن قرار می‌گیرند. به منظور بررسی تاثیر پیر شدگی بر مخلوط‌های مختلف مقدار شاخص پیر شدگی مخلوط‌ها برای کرنش تجمعی بعد از ۶۰۰۰ سیکل بارگذاری محاسبه گردید که این شاخص‌ها برای پیر شدگی بلند مدت و کوتاه مدت با محاسبه نسبت کرنش تجمعی بعد از پیر شدگی به کرنش تجمعی قبل از پیر شدگی محاسبه گردیدند. نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در مخلوط‌های حاوی روغن موتور شاخص پیر شدگی بلند مدت از شاخص پیر شدگی کوتاه مدت بیشتر است که نشان دهنده



شکل ۱۳. منحنی خزش مخلوطها بعد از اعمال پیر شدگی کوتاه مدت



شکل ۱۴. منحنی خزش مخلوطها بعد از اعمال پیر شدگی بلند مدت



شکل ۱۵. شاخص پیر شدگی مخلوطهای مختلف برای کرش تجمعی در آزمایش خزش دینامیکی

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، بخش درشت دانه مصالح سنگی یک نوع بتن آسفالتی با خرده آسفالت ضایعاتی جایگزین گردیده و در درصد‌های مختلف با روغن موتور ضایعاتی جوانسازی گردیده و در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و بلند مدت تحت آزمایشات مارشال، مقاومت کششی و خزش انجام گرفت. نتایج مهم این تحقیق به شرح زیر می‌باشند.

جایگزینی سنگدانه‌ها با خرده آسفالت ضایعاتی بدون افزودن جوان کننده باعث افزایش استقامت مارشال، مقاومت کششی و مقاومت خزشی مخلوط می‌گردد.

در مخلوط‌های پیر نشده بازیافتی، مخلوط حاوی ۷٪ روغن ضایعاتی استقامت مارشال و روانی بیشتری از سایر درصد‌ها دارد. مقدار بهینه‌ای از روغن وجود دارد که بیشترین تاثیر را بر مشخصات مخلوط بازیافتی دارد. این مقدار بهینه برای خصوصیات مختلف متفاوت می‌باشد.

پیرشدگی باعث افزایش استقامت مارشال، کاهش روانی و افزایش نسبت مارشال می‌شود. با افزایش روغن ضایعاتی تاثیر پیرشدگی بر افزایش استقامت مارشال کاهش می‌یابد، اما تاثیر پیر شدگی بر کاهش روانی تا حدی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت بر افزایش نسبت مارشال تا حدود ۷٪ روغن کم شده و بعد از افزایش می‌یابد.

مقاومت کششی و مقاومت خزشی مخلوط بازیافتی با افزایش روغن موتور به دلیل نرم کنندگی روغن کاهش می‌یابد. اعمال پیرشدگی بر روی مخلوط‌ها باعث افزایش مقاومت کششی و مقاومت خزشی آنها می‌گردد.

تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر افزایش مقاومت کششی با افزایش روغن موتور کاهش می‌یابد و در درصد‌های بالای روغن اعمال پیرشدگی بلند مدت باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد.

تاثیر پیرشدگی در افزایش مقاومت خزشی با زیاده‌تر شدن مقدار روغن افزایش می‌یابد. همچنین، در مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن تاثیر پیر شدگی بلند مدت بر افزایش مقاومت خزشی کمتر از پیر شدگی کوتاه مدت است.

نتایج این تحقیق بیانگر این است تاثیر پیر شدگی بر مقاومت خزشی خیلی بیشتر از تاثیر آن بر مقاومت کششی و خصوصیات مارشال می‌باشد.

## ۷- پی‌نوشت‌ها

1. Reclaimed Asphalt Pavement
2. Waste Engine Oil
3. Used Lubricant Oil

## ۸- 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.
- 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.
- 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.
- 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, April, 2-4, <https://doi.org/10.11159/icsenm17.142>.
- 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.
- 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.
- Jia, X., Huang, B., Moore, J. A., and Zhao, S.

- asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent. *International Journal of Pavement Engineering*, pp.1-11.
- 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-042816-63006/unrestricted/rveeraragavan.pdf>.
- Xu, G., Yu, Y., Wang, T., Chen, X., & Yang, J. (2019), "Rejuvenating Mechanism of Aged Asphalt with Bio-Rejuvenator from Micro Aspect. In CICTP, 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.
- 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.
- 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., Poulidakos, 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, 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.
- (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.
- 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*, No.223, pp.394-408.
- 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.
- 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.
- Shen, J., Amirkhani, 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) m mixtures', Report No. MN/RC-2002-15, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN.
- Taherkhani, H., & Noorian, F., (2018), "Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, pp.1-20.
- Taherkhani, H., & Noorian, F., (2019), "Laboratory investigation on the properties of



# Investigating the Effects of Ageing on the Properties of Recycled Asphalt Concrete Containing Waste Engine Oil as Rejuvenator

*Hasan Taherkhani, Associate Professor, Civil Engineering Department,  
University of Zanzan, Zanzan, Iran.*

*Javad Najafi, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department,  
University of Zanzan, Zanzan, Iran.*

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

Received: October 2021- Accepted: May 2022

## ABSTRACT

In this study the effects of short and long term ageing on some of engineering properties of recycled asphalt concrete containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) and rejuvenated by different dosages of waste engine oil (WEO) have been investigated. The coarse fraction of asphalt concrete has been replaced with RAP and the mixture has been rejuvenated by different dosages, namely 0, 4, 7 and 10% (by the weight of total binder) of WEO, and the volumetric and Marshall properties, indirect tensile strength (ITS) and creep properties of the mixtures after experiencing different ageing conditions including un-aged, short term and long term ageing have been evaluated. Results reveal that inclusion of RAP into mixture increases the optimum binder content, Marshall Stability and quotient, ITS and creep resistance; the Marshall stability and quotient, optimum binder content, ITS and creep resistance decreases with increasing WEO content. In un-aged condition, Marshall Stability and quotient increase up to 7% of WEO content, beyond which the trend reverses. Also, ageing results in increase of Marshall Stability, ITS and creep resistance, and decrease of flow with more effect after long term ageing. The degree of ageing effect on the properties depends on the type of ageing, type of mixture and amount of rejuvenator. The effect of ageing on Marshall Quotient increases up to 7% of WEO content, beyond which decreases. For ITS the effect of ageing decreases with increase of WEO content, and for creep resistance, the effect of ageing increases with increase of WEO content. The Marshall stability and ITS are more affected by ageing in recycled mixtures than in control mixture and the level effect decreases with increase of WEO. Furthermore, results reveal that creep resistance is more affected from ageing than the ITS and Marshall properties.

**Keywords:** Ageing, Creep Resistance, Indirect Tensile Strength, Recycled Asphalt Concrete, Waste Engine Oil