

# بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک

## ضایعاتی

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

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

حمید رضا اکبری، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان، زنجان، ایران

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

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

## چکیده

درصدهای مختلفی از پودر لاستیک به دو روش تر و خشک به مخلوط اضافه شده و مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی قبل و بعد از پیر شدگی بلند مدت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهند که در روش اختلاط تر و خشک، مقدار بهینه پودر لاستیک، که به ازای آن مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب حداکثر می باشد، به ترتیب ۱ و ۱۰٪ می باشد، که به ازای آنها، مقاومت کششی در حالت خشک در روش اختلاط خشک و تر، به ترتیب ۲۰ و ۱۸٪ بیشتر از آن در مخلوط کنترل است. اما، در حالت مرطوب، مقاومت کششی نمونه های حاوی مقادیر بهینه پودر لاستیک در حالت خشک و تر تقریباً ۰ و ۱۷٪ بیش از مقاومت کششی نمونه کنترل است. در مخلوط آسفالتی بدون لاستیک و حاوی درصدهای مختلف لاستیک به روش خشک و تر، پیر شدگی باعث افزایش جزیی در مقاومت کششی می گردد. از دیگر نتایج به دست آمده می توان به افزایش حساسیت رطوبتی در اثر پیر شدگی برای مخلوطهایی که لاستیک به صورت تر به آنها اضافه شده اشاره نمود. به طوری که نسبت مقاومت کششی نمونه هایی که مقدار بهینه پودر لاستیک به صورت تر به آنها افزوده شده از حداقل مورد نیاز مشخصات فنی کمتر می شود. در حالی که، در مخلوطهایی که به آنها لاستیک به صورت خشک اضافه گردیده است، پیر شدگی باعث کاهش حساسیت رطوبتی می گردد و مخلوط حاوی مقدار بهینه پودر لاستیک دارای نسبت مقاومت کششی ۹۸٪ می گردد.

واژه های کلیدی: بتن آسفالتی، لاستیک ضایعاتی، پیر شدگی، مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی

## ۱. مقدمه

مختلف خودروهای سواری و کامیونها دارای ترکیبات و خصوصیات مختلفی می‌تواند باشد. در برخی از کارگاهها لاستیکها به همراه الیاف نخی و فولادی خرد می‌شوند و در موارد دیگر این بخش‌ها جدا شده و قسمت الاستومری خرد می‌شود. بررسی ادبیات فنی نشان دهنده این است که استفاده از لاستیکهای ضایعاتی در روسازی‌های آسفالتی دارای تاثیرات مثبتی است. استفاده از لاستیک‌های ضایعاتی در مخلوطهای آسفالتی باعث بهبود عملکرد مخلوطهای آسفالتی از طرق زیر می‌گردد: (۱) حساسیت دمایی را کاهش می‌دهد، (۲) رفتار ارتجاعی را بهبود می‌بخشد، (۳) مقاومت در مقابل اکسیداسیون و پیرشدگی را کاهش می‌دهد، و (۴) عملکرد مخلوط را در مقابل ترک خوردگی خستگی و تغییر شکل دائمی بهبود می‌دهد. [Moreno et al. 2012, State of California Department of Transportation, 2006]، که باعث کاهش هزینه‌های نگهداری خواهد شد. علاوه بر این، استفاده از قیرهای لاستیکی، که از ترکیب قیر خالص و لاستیک ضایعاتی تهیه می‌شود، منجر به این می‌شود که، به دلیل کاهش ضخامت روسازی، زمان اجرا کاهش یابد، صدای ترافیک کاهش یابد، به دلیل ایجاد تمایز بین رنگ خط کشی‌ها و رنگ سیاه تر قیر لاستیکی ایمنی افزایش یابد و در مصرف انرژی و منابع طبیعی صرفه جویی شود [Presti, 2013]. چندین موسسه حمل و نقل در آمریکا روش‌های طرح اختلاط برای مخلوطهای آسفالتی لاستیکی ارائه نموده‌اند [Morris and Carlson, 2001]. برای استفاده از لاستیکهای ضایعاتی در ساخت مخلوطهای آسفالتی آنها را به صورت قطعات ریز خرد می‌کنند. چندین روش برای خردکردن لاستیکهای استفاده می‌گردد که عبارتند از: (۱) خرد کردن در دمای معمولی، که معمولا خرده‌هایی را ایجاد می‌کند که دارای شکل نامنظم تر و سطح تماس بیشتری بوده و با قیر بهتر واکنش نشان می‌دهند، (۲) خرد کردن بعد از انجماد لاستیک در دماهای از حدود ۸۷ تا ۱۹۸ درجه زیر صفر با استفاده از مایع نیتروژن و شکننده کردن

لاستیکهای مورد استفاده در خودروها دارای عمر محدودی بوده و بعد از استفاده به مواد ضایعاتی تبدیل می‌شوند. سالانه حدود ۱/۴ میلیارد لاستیک در دنیا فروخته می‌شود که در نهایت اسقاط می‌شوند [Han et al., 2016; Presti, 2013]. پیش بینی می‌شود در آینده با افزایش تولید خودروها مقدار تولید لاستیکهای ضایعاتی نیز افزایش یابد. موسسه حفظ محیط زیست آمریکا گزارش نمود که در سال ۲۰۰۳ بیش از ۲۹۰ میلیون حلقه لاستیک ضایعاتی در آمریکا تولید گردیده است [Presti, 2013]. در اروپا نیز سالانه ۳۵۵ میلیون حلقه لاستیک تولید می‌شود که ۲۴٪ از تولید لاستیک در کل دنیا را تشکیل می‌دهد [ETREMA statistics, 2012]. اغلب این لاستیکها در طبیعت رها شده و بخش کمی از آنها بازیافت شده و مجددا استفاده می‌شوند و بخشی از آنها نیز به عنوان سوخت استفاده می‌شوند. به دلیل دوام زیاد، لاستیک در طبیعت مشکلات زیادی را برای سلامت مردم و محیط زیست ایجاد می‌کند. خطر آتش‌سوزی، ایجاد محلی برای لانه حشرات و حیوانات موزی از جمله خطرات لاستیکهای ضایعاتی برای انسانها هستند. اغلب کشورها برای دفع لاستیکهای ضایعاتی از آنها به عنوان پرکننده استفاده می‌کنند. اما، محدودیت جا و پتانسیل بکارگیری از لاستیکهای ضایعاتی در سایر مصارف باعث شده است که خیلی از کشورها این عمل را محدود نمایند. با توجه به افزایش تولید لاستیکهای ضایعاتی در دنیا و عدم وجود برنامه‌ای مشخص برای بازیافت آنها استفاده از آنها به شکل پودر لاستیک در مخلوطهای آسفالتی می‌تواند باعث بهبود محیط زیست گردد [Danesh et al. 2017]. لاستیکهای خودروها معمولا از سه بخش اصلی تشکیل یافته‌اند که عبارتند از یک ترکیب الاستومری، پارچه و فولاد. پارچه و فولاد اسکلت لاستیکها را تشکیل داده و ترکیب الاستومری بدنه لاستیک را تشکیل می‌دهد. معمولا از بخش الاستومری لاستیکها در ساخت آسفالت استفاده می‌شود. بخش الاستومری لاستیک برای لاستیکهای

## بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی

داسیلوا و همکارانش خصوصیات مقاومت به شیار شدگی، خستگی و گسترش ترهای انعکاسی در بتن آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک ریز به روش خشک را مطالعه نموده و نتیجه گیری نمودند که بتن آسفالتی اصلاح شده عملکرد بهتری از نظر مقاومت به ترک خوردگی، شیار شدگی و گسترش ترک انعکاسی نسبت به مخلوط کنترل دارد [Da Silva et al. 2018]. لاستراگونزالز و همکارانش یک نوع بتن آسفالتی بدون ماده افزودنی را با ۴ نوع بتن آسفالتی اصلاح شده با ضایعات پلاستیک، شامل پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استر و خرده لاستیک، به روش خشک، مقایسه کردند و نشان دادند که در مقایسه با سایر مخلوطها و مخلوط کنترل عملکرد آسفالتی لاستیکی از نظر مقاومت به تغییر پلاستیک بهتر است [Lastra-Gonzalez et al. 2016]. ژی و شن با افزودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه (SMA) به روش خشک و انجام آزمایشهای مدول دینامیکی، حساسیت رطوبتی، شیار شدگی و خستگی دریافتند که افزودن خرده لاستیک باعث بهبود مدول دینامیکی و شیار شدگی در دمای بالا شده، اما، تاثیر زیادی بر روی حساسیت رطوبتی و مقاومت خستگی ندارد [Xie and Shen, 2016]. اونسوالای و سانگپتنگام خرده لاستیک در سه اندازه ۱/۱۸-۲/۳۶-۰/۶-۱/۱۸ و ریزتر از ۰/۶ میلیمتر را در دو مقدار ۱ و ۲٪ (نسبت به وزن کل سنگدانه ها) به روش خشک به بتن آسفالتی افزوده و مقاومت به شیار شدگی آنها را اندازه گیری نمودن و دریافتند که مقاومت به شیار شدگی با افزودن مقدار خرده لاستیک و کاهش اندازه ذرات بهبود می یابد. آنها به این نتیجه رسیدند که مخلوط اصلاح شده با ۲٪ از خرده لاستیک ریزتر از ۰/۶ میلیمتر دارای مقاومت به تغییر شکلی ۲/۱ برابر بیشتر از مخلوط کنترل دارا بود. انگوین و ترن عملکرد بتن آسفالتی و SMA اصلاح شده با خرده لاستیک به روش خشک را مطالعه کرده و دریافتند که از نظر مقاومت به شیار شدگی و استقامت مارشال، مقدار ۱/۵ و ۲٪ وزن کل مخلوط از خرده لاستیک، به ترتیب، برای بتن آسفالتی و SMA بهینه می باشد [Nguyen and Tran, 2018]. در مقدار بهینه از خرده

آن، که با چکش خرد می شوند و در این حالت ذرات ایجاد شده دارای شکل منظم تری بوده و سطح تماس کمتری دارند، ۳) خرد کردن در آب، که در آن قطعات لاستیک با استفاده از دو چرخ در داخل یک مایع واسط که معمولا آب می باشد خرد و ریز می شوند و ۴) ریز کردن با فشار آب، که با جت آب با فشار بسیار بالا ذرات ریز لاستیک تولید می شوند.

همانگونه که ذکر گردید، به منظور حل مشکلات زیست محیطی مربوط به لاستیکهای ضایعاتی و بهبود کیفیت مخلوطهای آسفالتی، امروزه استفاده از خرده لاستیکهای ضایعاتی در ساخت مخلوطهای گرم گسترش یافته است. خرده لاستیک به عنوان یک اصلاح کننده قیر شناخته می شود، چون حضور آن بر روی خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی موثر است. منبع اصلی مواد خام برای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با خرده لاستیک، لاستیکهای ضایعاتی خودروها هستند که ترکیبی از لاستیک طبیعی، مصنوعی و کربن سیاه هستند. لاستیک طبیعی خواص ارتجاعی را به قیر می دهد، در حالی که، لاستیک مصنوعی پایداری حرارتی را بهبود داده و افزودن کربن سیاه دوام قیر را بهبود می دهد [Papagianakis and Lugheed, 1995]. عموما، به سه روش خرده لاستیکها به مخلوط آسفالتی افزوده می شوند که عبارتند از: روش خشک، روش تر و اختلاط پایانه ای [Xie and Shen, 2016]. در روش خشک معمولا خرده لاستیکها جایگزین سنگدانه ها در مخلوط آسفالتی می گردند و قبل از اختلاط با قیر، در مخزن اختلاط کارخانه آسفالت با مصالح سنگی داغ مخلوط می شوند. بعد از اختلاط مصالح سنگی و خرده لاستیک، قیر به آنها اضافه شده و مخلوط می شود. واکنش بین قیر و خرده لاستیک در فرصتی که بعد از افزودن قیر داده می شود رخ می دهد. در روش خشک، بسته به نوع خرده لاستیک، مقدار آن و روش ساخت عملکردهای متفاوتی مشاهده گردیده است [Cao, 2007]. اما، روش خشک برای تولید کننده آسان تر و اقتصادی تر است، زیرا نیازی به مخزن اختلاط و تجهیزات پایانه ای نیست. روش خشک به جهت ارزان بودن و امکان استفاده بیشتر از خرده لاستیک مورد توجه است.

نشان داد که قروش پایانه ای پایداری ذخیره سازی و عملکردی بهتری از قیر اصلاح شده به روش تر در محل دارد. همچنین، مخلوطهای آسفالتی لاستیکی در روش تر و پایانه ای خصوصیات عملکردی مشابه یا بهتری از مخلوطهای آسفالتی کنترل دارند [Han et al. 2016; Presti, 2013; Ding et al. 2017].

مطالعات زیادی در گذشته بر روی عملکرد قیرها و مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با لاستیک به روش تر یا پایانه ای انجام گرفته است، که همگی آنها نشنا دهنده این است که اختلا قیر و خرده لاستیک مخلوط همگنی را نتیجه خواهد داد که عملکرد بهتری را نسبت به قیر و مخلوط پایه دارند [Abdelrahman and Carpenter, 1999; Neto et al., 2006; Navaro et al., 2005; Lee et al., 2008; Ziari et al., 2016; Venudharan and Biligiri, 2016a and 2016b; Venudharan and Biligiri, 2017a and 2017b; Venudharan et al., 2018] ونودهاران و همکارانش با مطالعه بر روی انواع قیرهای اصلاح شده با خرده لاستیک نتیجه گیری کردند که خرده لاستیک باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی شده و بر روی خواص شیمیایی و حرارتی آنها تاثیر می گذارد. همچنین، آنها نتیجه گرفتند که درصد بالاتر و ریزدانه تر بودن خرده لاستیک باعث عملکرد بهتر قیر تحت شرایط ترافیکی و محیطی سخت خواهد شد [Venudharan et al. 2018].

بر اساس بررسی مطالعات انجام گرفته بر روی مقاومت به آسیب رطوبتی مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با لاستیک، نتایج نشان می‌دهد که یافته‌های محققین هماهنگ نبوده و گاهی متناقض اند. از طرفی برخی از محققین بیان می‌کنند که استفاده از قیر لاستیکی مقاومت به آسیب رطوبتی را بهبود می‌دهد [Partl et al. 2010; Hossain et al. 2015]. اما، برخی محققین دیگر نیز دریافته‌اند که مقاومت در برابر آسیب رطوبتی با استفاده از لاستیک در مخلوط آسفالتی کمی کاهش می‌یابد [Xiao and Amir Khanian, 2009; Perez and Pasandin, 2017]. بنابراین، این موضوع نیاز به بررسی بیشتری دارد. به ویژه این که تاثیر روش افزودن لاستیک مطالعه نشده است. همچنین، مطالعات

لاستیک مخلوطها عملکرد بهتری از مخلوطهای اصلاح شده با خرده لاستیک به روش تر از خود نشان دادند. آنها همچنین، دریافتند که با افزایش زمان ذخیره سازی مخلوطهای آسفالتی داغ اصلا عملکرد آنها بهبود می‌یابد. معمولا استقبال کمتری از روش خشک می‌شود، زیرا بعضی از محققین عقیده دارند که این روش نتایج رضایت بخشی را به ویژه در سالهای اولیه نداده است [Shook, 1990; Lawrence et al. 1991; Buncher, 1995]. کیفیت مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با این روش پایین تر می‌باشد و دلیل آن عمدتا به خاطر واکنش ضعیف بین لاستیک و قیر می‌باشد. عربانی و همکارانش با اعتقاد بر اینکه مخلوط آسفالتی اصلاح شده با خرده لاستیک به روش خشک عملکرد مناسبی از نظر شیار شدگی، ترک خوردگی خستگی و حساسیت رطوبتی ندارند، این ویژگی‌ها را با افزودن نانو ماده زایکو سویل بهبود دادند [Arabani et al. 2018]. در روش تر، خرده لاستیک به قیر داغ در دمای بالا (۱۷۰ تا ۲۰۵°C) اضافه شده و آنقدر هم زده می‌شود تا اندرکنش بین قیر و خرده لاستیک رخ دهد، که بعد از آن با سنگدانه های داغ مخلوط می‌شوند. اختلاط خرده لاستیک و قیر خالص در داخل مخازنی در کارخانه آسفالت انجام می‌شود. قیرهای به وجود آمده از روش تر را قیرهای لاستیکی می‌نامند که علاوه بر ساخت مخلوطهای آسفالتی داغ، از آنها در درزگیری ترکها و ساخت آسفالت‌های حفاظتی نیز استفاده می‌گردد. در این حالت خرده لاستیک جایگزین بخشی از قیر خالص می‌گردد. در اختلاط پایانه ای، خرده لاستیک و یا پلیمرهای دیگر در کارخانه تولید قیر یا پالایشگاهها به آنها افزوده شده و به محل مصرف حمل شده و در داخل مخازن در کارخانه آسفالت ذخیره می‌گردد. روشهای اختلاط مختلف ممکن است خواص عملکردی متفاوتی را برای مخلوطهای آسفالتی لاستیکی نتیجه دهند. دینگ و همکارانش عملکرد قیر و مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با خرده لاستیک به روش تر را مطالعه نمودند [Ding et al. 2017]. در مطالعه آنها خرده لاستیک به دو روش تر و پایانه ای به قیر افزوده شد. نتایج آنها

## بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی

فنی مصالح سنگی به کار رفته در این تحقیق نیز اندازه گیری شدند که، به ترتیب، در جداول ۲ و ۳ ارائه گردیده اند. قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع خالص ۷۰-۶۰ است که از پالایشگاه اصفهان تهیه شد. جدول ۴ نتایج آزمایش‌های استاندارد انجام شده بر روی قیر و حدود مشخصات فنی را نمایش می‌دهد.

در این تحقیق از پودر لاستیک تهیه شده از شرکت آذرسام قزوین که در شکل ۲ نشان داده شده است استفاده گردید. پودر لاستیک مصرفی از یک منبع و به روش آسیاب محیطی تولید شده است. مشخصات پودر لاستیک مصرفی در جدول ۵ و منحنی نمودار دانه‌بندی آن برای هر دو روش خشک و مرطوب در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، پودر لاستیک مصرفی برای روش تر ریزدانه تر بوده است. در فرآیند تر، پودر لاستیک با اندازه ذرات از ۰/۰۷۵ تا ۰/۴ میلی‌متر (الک شماره ۴۰) و در روش خشک پودر لاستیک با اندازه ذرات ۰/۰۷۵ تا ۰/۶ میلی‌متر (الک شماره ۳۰) استفاده گردید



شکل ۱. مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

محدودی که در مورد اثر پیر شدگی انجام شده مربوط به تاثیر پیر شدگی بر روی قیر است [Wang et al. 2016; Sobhy et al. 2018]. که نشان دهنده افزایش مقاومت به پیر شدگی با افزودن لاستیک به قیر است. اما، این موضوع نیز به مطالعه بیشتر نیاز دارد، از جمله پیر شدگی مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با لاستیک به دو روش خشک و تر مطالعه نگردیده اند. بنابراین، در این تحقیق هدف آگاهی بیشتر از مقاومت به آسیب رطوبتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با خرده لاستیک به روش تر و خشک و مقایسه آنها، و همچنین، تاثیر پیر شدگی بلند مدت بر روی عملکرد بتن آسفالتی اصلاح شده با لاستیک، شامل مقاومت کششی و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی، می باشد که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته اند.

## ۲. مواد و مصالح

مواد بکار رفته در این تحقیق، شامل مصالح سنگی، قیر خالص و پودر لاستیک ضایعاتی هستند. مصالح سنگی از جنس آهکی در اندازه های مختلف شامل درشت (۱۹-۱۲)م، متوسط (۱۲-۶)م، ریز دانه (۶-۰)م و فیلر از معدن کوه پیما در استان خراسان رضوی تهیه گردید (شکل ۱). آزمایشات دانه بندی، تعیین مرغوبیت، وزن مخصوص و جذب آب بر روی مصالح سنگی در اندازه های مختلف مطابق استانداردهای مربوطه انجام گرفت. برای تهیه مخلوطهای آسفالتی از دانه بندی شماره ۴ (نشریه ۲۳۴) استفاده گردید. از این رو، درصدهای اختلاط هر بخش از مصالح سنگی طوری تعیین گردیدند تا دانه بندی مخلوط در داخل محدوده قرار گیرد. جدول ۱ محدوده دانه بندی آیین نامه و دانه بندی مخلوطهای مورد استفاده در تحقیق را که از اختلاط مصالح سنگی درشت، متوسط، ریز و فیلر به دست آمده است نشان می دهد. مشخصات فیزیکی و

جدول ۱. مشخصات دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

اندازه الک (میلیمتر)	حدود مشخصات دانه بندی شماره ۴ (نشریه ۲۳۴)	دانه بندی مخلوطهای مورد استفاده
۱۹	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰	۹۵
۴/۷۵	۴۴-۷۴	۴۹
۲/۳۶	۲۸-۵۸	۳۳
۰/۳	۵-۲۱	۱۰
۰/۰۷۵	۲-۱۰	۵

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

مشخصه	نتایج آزمایش			حدود مشخصات
	مخلوط درشت- دانه	ماسه	فیلر	
ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)	-	۵۷	-	۵۰<
درصد افت وزنی در مقابل سایش	C	-	-	
به روش لوس آنجلس	۵۰۰	-	-	
درصد سایش (AASHTO-T96)	۱۸	-	-	۲۵>
دامنه خمیری (PI)	-	NP	NP	غیر خمیری
حدود اتبرگر (AASHTO-T89,90)	حد خمیری (PL)	-	-	غیر خمیری
	حد روانی (LL)	-	-	غیر خمیری
درصد شکستگی مصالح سنگی	۹۵	-	-	-
روی الک شماره ۴ (ASTM-D5821)	۹۰	-	-	۹۰<
درصد تطویل و تورق	۹	-	-	-
تورق (BS-812)	۲۷	-	-	۲۵>
درصد افت وزنی در مقابل سولفات	ریزدانه	۱	-	۱۲>
سدیم	درشت دانه	۱	-	۸>
(AASHTO-T104)				
اثر آب جوش روی مصالح سنگی اندود شده با قیر (ASTM-D3625)				۹۵<
				درصد چسبندگی قیر به مصالح سنگی بیش از ۹۵ است

بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی

جدول ۳. مشخصات حجمی مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

درصد جذب	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
آب			
۰/۷	۲/۶۵۶	۲/۷۰۵	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۴	۲/۶۱۶	۲/۷۱۵	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-		۲/۶۷۷	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲/۶۴۶		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی، Gsb

جدول ۴. آزمایش های انجام شده بر روی قیر و نتایج و حدود مشخصات استاندارد

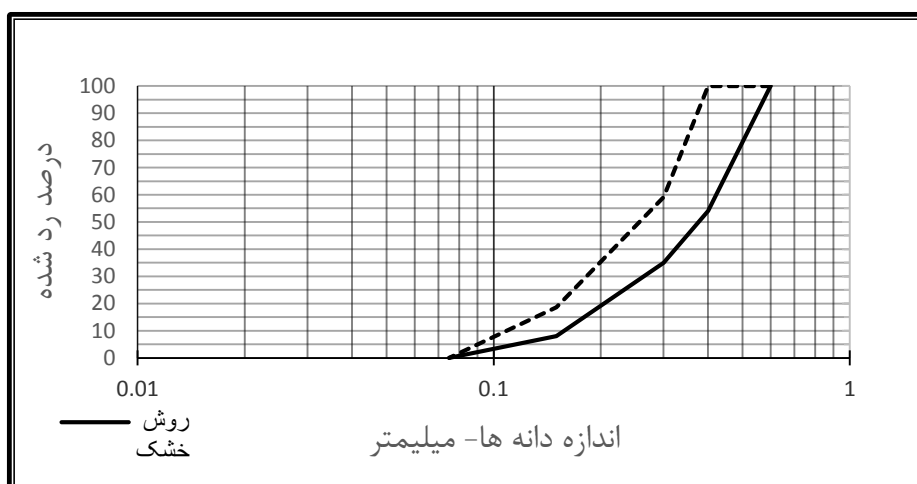
ردیف	آزمایش های قیر خالص	روش آزمایش		نتایج	مشخصات طبق استاندارد	
		AASHTO	ASTM		AASHTO M20	
		حداکثر	حداقل			
۱	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	T228	D70	۱/۰۱۳	-	-
۲	درجه نفوذ در ۲۵°C (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه) بر حسب ۰,۱ میلی متر	T49	D5	۶۲	۶۰	۷۰
۳	نقطه نرمی (ساجمه - حلقه) بر حسب سانتی - گراد	T53	D36	۴۹/۵	۴۹	۵۶
۴	مقدار کشش در ۲۵°C بر حسب سانتی متر	T51	D113	۱۰۰<	۱۰۰<	-
۵	درجه اشتعال (رو باز - کلونند) بر حسب درجه سانتی گراد	T48	D92	۳۱۲	۲۳۲	-
۶	لعب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتی گراد - پنج ساعت)	T179	D1754	-	-	-
۷	افت وزنی در آزمایش لعب نازک قیر. %	-	-	-	-	۰/۸
۸	نسبت درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه	-	-	۷۴,۲	۵۴	-
۹	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش افت حرارتی در ۲۵°C بر حسب سانتی متر	-	-	۵۰<	۵۰	-



شکل ۲. پودر لاستیک مورد استفاده در تحقیق

جدول ۵. مشخصات پودر لاستیک

مقادیر	خصوصیات
۱/۱۶	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )
۵٪	خاکستر (درصد)
۱۰٪	پلاستیک (درصد)
۲۹٪	کربن سیاه (درصد)
۵۰٪	پلیمر (درصد)
۰-۱/۱۹	اندازه ذرات (میلیمتر)



شکل ۳. دانه بندی پودر لاستیک مصرفی

### ۳. روش تحقیق

است. یکی از مهم ترین خصوصیات بتن آسفالتی، مقاومت در برابر آسیب های رطوبتی است. مقدار و روش اختلاط پودر لاستیک می تواند بر حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی موثر باشد. به منظور بررسی اثر مقدار و روش اختلاط پودر لاستیک با قیر

با توجه به گسترده شدن استفاده از لاستیکهای ضایعاتی در ساخت مخلوط آسفالتی، مطالعه ویژگی های مختلف مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با لاستیکهای ضایعاتی دارای اهمیت زیادی



## بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی

و حرارت دادن آنها بر اساس دماهای تعیین شده برای اختلاط و تراکم، با استفاده از میکسر آزمایشگاهی با یکدیگر مخلوط شده و نمونه های آسفالتی در درصدهای مختلف قیر از ۳/۵ تا ۶٪ ساخته شده و با اندازه گیری وزن مخصوص، استقامت مارشال و روانی، تغییرات آنها بر حسب درصد قیر ترسیم گردید. همچنین، به منظور تعیین ویژگی های حجمی مخلوط، وزن مخصوص حداکثر نظری با استفاده از آزمایش رایس بر روی نمونه های غیر متراکم تعیین گردید. با استفاده از چگالی واقعی و حداکثر نظری مخلوط، درصد وزنی قیر و مصالح سنگی و چگالی واقعی قیر و مخلوط مصالح سنگی، درصد فضای خالی مخلوط های متراکم، فضای خالی مصالح سنگی و فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر محاسبه گردید و تغییرات آنها بر حسب درصد وزنی قیر ترسیم گردید. با استفاده منحنی های تغییرات، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی پایه بدون مواد افزودنی حدود ۵٪ تعیین گردید. برای تعیین مقدار قیر بهینه حاوی درصدهای مختلف پودر لاستیک اضافه شده به صورت خشک، ابتدا برای بیشترین درصد پودر لاستیک (۱/۵٪)، نمونه هایی با درصد قیرهای مختلف ۵، ۵/۵ و ۶ ساخته شده و مقدار فضای خالی اندازه گیری گردید و مقدار قیر بهینه برای درصد فضای خالی ۴٪ و کنترل سایر مشخصات فنی انتخاب گردید. برای مخلوطهای حاوی درصد های دیگر پودر لاستیک، مقدار قیر بهینه با درونبایی خطی بین قیر بهینه مخلوط شاهد و قیر بهینه مخلوط حاوی ۱/۵٪ پودر لاستیک تعیین گردید. برای روش تر نیز به طور مشابه عمل گردید. جدول ۶ مقدار قیر بهینه مخلوطهای مختلف و نام هر کدام از مخلوطها که در این تحقیق از آنها استفاده شده است را نشان می دهد.

برای ساخت نمونه های حاوی پودر لاستیک در روش خشک به این صورت عمل شده است که سنگ دانه ( بدون فیلر) در دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت در گرم خانه قرار داده شد و پس از خارج کردن از گرم خانه، به منظور همگن شدن، به مدت ۱۰ ثانیه مخلوط گردید. سپس پودر لاستیک لازم به آن

و مصالح سنگی بر روی آسب رطوبتی، با بررسی منابع موجود و تحقیقات قبلی [Presti, 2013; Cao, 2007; Hernańdez-Olivares; 2009; Moreno et al. 2011; Feiteira Dias, 2014] درصدهای مختلف از پودر لاستیک به دو روش تر و خشک به مخلوط آسفالتی اضافه شده و حساسیت رطوبتی آنها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. در روش تر، پودر لاستیک به میزان ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی قیر، قبل از اختلاط با مصالح سنگی، با قیر مخلوط گردید، و در روش خشک، پودر لاستیک با ۱/۵ و ۱، ۰/۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی، قبل از اضافه شدن قیر، تا حصول مخلوطی همگن اختلاط گردید [Amirkhanian, 2001; Xiao et al. 2009; Sharma and Goyal, 2006]. همگنی اختلاط خرده لاستیک و مصالح سنگی به صورت چشمی ارزیابی گردید. همچنین، تاثیر پیر شدگی بلند مدت بر روی مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی حاوی پودر لاستیک مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های حاوی درصدهای مختلف پودر لاستیک که به دو روش تر و خشک به مخلوط اضافه شده اند، در معرض پیر شدگی بلند مدت قرار گرفته و مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب اندازه گیری شده و با نتایج در شرایط قبل از پیر شدگی بلند مدت مقایسه گردیدند.

### ۴. تهیه نمونه های آزمایشگاهی

به منظور تهیه و ساخت نمونه های مورد استفاده در آزمایشات، ابتدا مقدار قیر بهینه بتن آسفالتی بدون افزودنی پودر لاستیک، به روش مارشال و مطابق استاندارد ASTM D1559 تهیه گردید. برای ساخت نمونه ها برای تعیین قیر بهینه، ابتدا آزمایش تعیین ویسکوزیته قیر در سه دمای ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت، که به ترتیب ۶۵۵، ۴۲۰ و ۱۵۳ سانتی استوکس تعیین گردید، و بر اساس آنها و مقادیر توصیه شده ویسکوزیته برای اختلاط و تراکم، محدوده دمای اختلاط و تراکم نمونه ها مشخص گردید. با وزن کردن مصالح سنگی و قیر به مقدار لازم،

در این تحقیق حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی کنترل و حاوی پودر لاستیک بر اساس روش استاندارد ASTM-D4867 اندازه گیری شد. از هر مخلوط دو گروه نمونه استوانه-ای به قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ضخامت تقریبی ۶۴ میلی‌متر تهیه گردید. تعداد ضربات اعمال شده برای تراکم نمونه‌ها به صورتی تنظیم شد که درصد فضای خالی نمونه‌ها مشابه درصد فضای خالی آسفالت در محل یعنی بین ۶ تا ۸ درصد باشد. تعداد ضربات مورد نیاز به صورت سعی و خطا به دست آمد و نمونه‌هایی که دارای فضای خالی در محدوده مورد نظر بودند برای آزمایش انتخاب گردیدند. به منظور عمل آوری نمونه‌های مورد آزمایش، یک گروه سه تایی از نمونه‌ها به صورت غیر اشباع و گروه دیگر به صورت اشباع عمل آوری شدند. این گروه‌بندی به صورتی انجام شده که میانگین فضای خالی دو گروه مساوی باشد. نمونه‌های غیر اشباع تا زمان آزمایش در کیسه پلاستیکی در بسته و در دمای آزمایشگاهی نگهداری شده و ۲۰ دقیقه قبل از آزمایش در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نمونه‌های دیگر، به منظور اشباع شدگی فضای خالی آنها (به مقدار ۵۵ الی ۸۰ درصد)، نخست داخل آب قرار گرفته و با استفاده از یک پمپ، خلا زایی شدند و پس از قطع خلا زایی به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. درصد اشباع شدگی با استفاده از حجم آب جذب شده و حجم فضای خالی محاسبه شد. پس از عمل آوری نمونه‌های اشباع و به منظور اصلاح دمای نمونه تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های اشباع به مدت یک ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. به منظور تعیین مقاومت کششی از دستگاه مارشال استفاده شده است که فک دستگاه مارشال با فک آزمایش کشش غیرمستقیم طبق استاندارد تعویض شد (شکل ۴).

افزوده شده و برای اطمینان از پخش شدن در کل مخلوط، به مدت ۲۰ ثانیه مخلوط گردید. پس از اضافه کردن قیر، برای حصول مخلوطی همگن، ۲ دقیقه عمل اختلاط انجام گرفت. در انتها نیز فیلر افزوده شده و عمل اختلاط سه دقیقه به طول انجامید. این روش اختلاط در تحقیقات قبلی توصیه شده و مورد ارزیابی نیز قرار گرفته است [Moreno et al. 2011]. برای ساخت نمونه‌های روش تر، نخست پودرلاستیک با درصد مشخص با قیر به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد توسط همزن با دور بالا مخلوط گردید. سپس قیر حاصل با سنگ‌دانه در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شد. پس از اختلاط، هر نمونه نامتراکم داخل ظرفی در درون گرم‌خانه‌ای با دمای تراکم به مدت ۲ ساعت نگهداری شد. در فاصله یک ساعت گذشته از اختلاط ظرف حاوی نمونه از گرم‌خانه خارج شده و عمل اختلاط به منظور یکنواختی پیرشدگی قیر انجام شد و سپس برای تکمیل شبیه‌سازی پیرشدگی یک ساعت دیگر درون گرم‌خانه قرار گرفت. عمل تراکم نمونه براساس انرژی تراکم مورد نیاز برای  $1 \pm 7$  درصد فضای خالی به وسیله کاهش تعداد ضربات چکش مارشال انجام شد. نمونه متراکم پس از ۲۴ ساعت به وسیله نمونه از قالب مارشال خارج گردیده و برای انجام آزمایش استفاده گردیدند. در این تحقیق مجموعاً ۷۲ نمونه برای هر دو روش اختلاط (خشک و تر) و سه درصد مختلف پودر لاستیک برای هر روش و دو سری نمونه عادی و پیرشدگی ساخته شد. ضمناً ۱۲ نمونه مخلوط آسفالتی بدون پودر لاستیک و با قیر خالص برای نمونه کنترلی ساخته شد.

## ۵. انجام آزمایش های حساسیت رطوبتی

## بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی

جدول ۶. مقدار قیر بهینه مخلوطهای مختلف حاوی پودر لاستیک

تر			خشک			روش اختلاط
۵	۱۰	۲۰	۰/۵	۱	۱/۵	درصد پودر لاستیک
15W	10W	5W	0.5D	1D	1.5D	نام مخلوط
۵/۲	۵/۴	۵/۸	۵/۳۳	۵/۶۶	۶	قیر بهینه

سریع تر رخ می دهد. به این دلیل، اختلاط قیر با مصالح سنگی در دمای پخت مخلوط آسفالتی را می توان مرحله ای دانست که شدیدترین اکسیداسیون و سخت شدن قیر روی می دهد که پیر شدگی کوتاه مدت قیر نامیده می شود. پیر شدن قیر در



روسازی پس از

شکل ۴. آزمایش کشش غیر مستقیم

ساخت، یعنی طی دوره بهره برداری از راه، ادامه می یابد که این نوع پیر شدگی را پیر شدگی بلند مدت مخلوط آسفالتی می نامند. شبیه سازی پیر شدگی کوتاه مدت و بلند مدت در قیر به روش های مختلفی انجام می شود که در برخی از آنها پیر شدگی بر روی قیر اعمال می شود و در برخی نیز پیر شدگی به مخلوط آسفالتی اعمال می شود. در این تحقیق پیر شدگی بر روی مخلوط آسفالتی اعمال گردید. در این تحقیق از روش پیر شدگی مخلوط آسفالتی مطابق با استاندارد AASHTO R30 استفاده شده است، که در آن، مخلوط آسفالتی متراکم در گرم خانه با دمای  $85 \pm 3$  درجه سانتی گراد به مدت  $120 \pm 0.5$  ساعت قرار

مقاومت کششی نمونه ها با اعمال بار توسط نوارهای فک بارگذاری دستگاه با سرعت  $50 \text{ mm/min}$  و قرائت حداکثر نیروی وارده، و استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

(۱)

$$ITS = \frac{2000P}{\pi tD}$$

$ITS$  مقاومت کششی برحسب مگاپاسکال،  $P$  حداکثر بار برحسب نیوتن،  $D$  قطر نمونه برحسب میلی متر و  $t$  ضخامت یا ارتفاع نمونه برحسب میلی متر قبل از آزمایش است. شاخص مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر آسیب رطوبتی به صورت نسبت مقاومت کششی نمونه های اشباع پس از عمل آوری رطوبتی به مقاومت کششی نمونه های غیر اشباع ( $TSR$ ) با استفاده از رابطه (۲) تعیین می شود.

(۲)

$$TSR = \frac{ITS_C}{ITS_U}$$

$ITS_U$  میانگین مقاومت کششی نمونه های گروه غیر اشباع و  $ITS_C$  میانگین مقاومت کششی نمونه های گروه اشباع و عمل آوری شده در آب است.

پیر شدگی قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی در حین ساخت مخلوط و نیز در هنگام بهره برداری از روسازی ساخته شده رخ می دهد. پیر شدگی و سخت شدن قیر عمدتاً به علت اکسیداسیون قیر با اکسیژن موجود در هوا روی می دهد. این فرآیند در دمای بالا، مثل دمای پخت مخلوط آسفالتی، زمانی که قیر بصورت یک لعاب نازک سطح سنگدانه ها را پوشش می دهد

گرفت. پس از پایان این مدت زمان، گرم‌خانه خاموش و درب گرم‌خانه باز شد تا دمای نمونه‌ها با دمای محیط یکسان شود. نمونه‌ها پس از حداقل ۲۴ ساعت از گرم‌خانه خارج گردید [Bell et al., 1994].

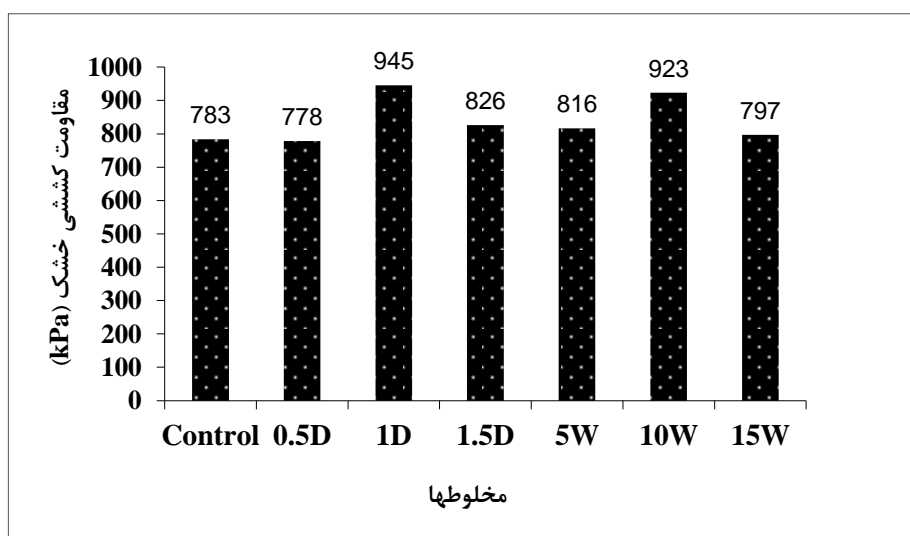
## ۶. نتایج و بحث

یکی از ویژگی‌های مهم مخلوطهای آسفالتی مقاومت کششی آنهاست. مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی به مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی و مقاومت در برابر تغییر شکل ارتباط می‌یابد [Islam et al. 2015]. شکل ۵ مقدار مقاومت کششی نمونه در حالت خشک را برای مخلوط کنترل و مخلوطهای حاوی پودر لاستیک با درصدهای مختلف، که به دو روش تر و خشک به مخلوط اضافه شده اند، نشان می‌دهد. در این شکل، و شکلهای بعدی در مقاله از حروف W و D برای نشان دادن روش اختلاط تر و خشک و اعداد 0.5، 1، 1.5، 5، 10 و 15 برای نامگذاری مخلوطها استفاده شده است. برای مثال، مخلوط 0.5D مخلوطی است که در آن ۰/۵٪ وزن کل مخلوط پودر لاستیک به آن اضافه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با افزودن مقدار معینی از پودر لاستیک به یک مخلوط، می‌توان به مقاومت کششی بیش از مخلوط کنترل دست یافت. تحقیقات قبلی نیز نشان داده اند که مخلوطهای آسفالتی لاستیکی دارای مقاومت در برابر تغییر شکل و ترک خوردگی بیشتری هستند [Cao, 2007; Han et al. 2016; Liseane et al. 2010; Pasquini et al. 2011; Presti, 2013]. در حالت تر، مقدار ۱۰٪ (نسبت به وزن قیر) و در حالت خشک مقدار ۱٪ پودر لاستیک (نسبت به وزن کل مخلوط) بالاترین مقاومت کششی را نتیجه خواهند داد. اما، با اضافه کردن مقدار بیشتری لاستیک، مقاومت کششی مخلوط کاهش می‌یابد. زیاد تر شدن مقاومت کششی با افزایش مقدار لاستیک تا حد معین به دلیل افزایش خاصیت جذب انرژی به

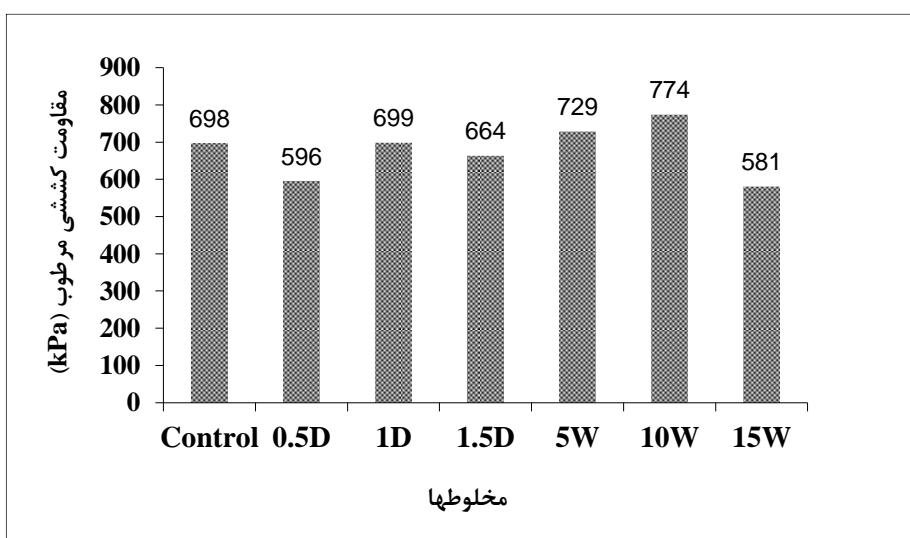
دلیل رفتار ارتجاعی لاستیک می باشد، اما با بیشتر شدن مقدار لاستیک از یک حد معین باعث کاهش قیر در مخلوط شده و چسبندگی کافی بین سنگدانه ها ایجاد نمی‌گردد. همچنین، بر اساس نتایج نشان داده شده در این شکل، می توان بیان کرد که در درصدهای کم پودر لاستیک روش تر نتایج بهتری را داشته، ولی در درصدهای بالاتر، روش خشک مخلوطهای با مقاومت کششی بیشتری را نتیجه می‌دهد. از این رو، با روش خشک می توان استفاده بیشتری از ضایعات لاستیک نمود که منفعت زیست محیطی بیشتری دارد.

شکل ۶ مقاومت کششی نمونه های عمل آوری شده در شرایط رطوبتی را برای مخلوطهای آسفالتی کنترل و حاوی پودر لاستیک نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، رطوبت باعث کاهش مقاومت کششی همه مخلوطها نسبت به حالت خشک شده است. در این حالت نیز بیشترین مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک در ۱۰٪ (به روش تر) و ۱٪ (به روش خشک) حاصل می شود. بنابراین، می توان بیان کرد که برای مخلوط آسفالتی مورد مطالعه در این تحقیق، ۱۰٪ پودر لاستیک به روش تر و ۱٪ به روش خشک مقادیر بهینه می باشند. همچنین، این نتایج بیانگر این است که به طور کلی افزودن پودر لاستیک به روش تر مقاومت کششی مرطوب بیشتری از روش خشک و کنترل نتیجه خواهد داد. البته، قابل ذکر است که در درصدهای بالای پودر لاستیک کاهش مقاومت کششی برای روش تر بیشتر بوده، به طوری که مخلوط حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک که به روش تر به قیر اضافه شده دارای مقاومت کششی کمتر از نمونه کنترل و نمونه های حاوی ۱۰٪ پودر لاستیک که به روش خشک افزوده شده دارد.

بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی



شکل ۵. مقاومت کششی خشک مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک



شکل ۶. مقاومت کششی مرطوب مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک

می‌توان به کم‌تر بودن قیر در مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک نسبت داد. این نتایج با یافته‌های تحقیقات انجام شده پیشین [Xiao and Amirkhanian, 2009; Perez and Pasandini, 2017] هماهنگ است. همچنین، در درصدهای پایین و متوسط از پودر لاستیک، استفاده از روش تر برای افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی نتایج بهتری از روش خشک

به منظور بررسی آسیب رطوبتی مخلوطها، نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط رطوبتی به مقاومت کششی نمونه‌های خشک (TSR) محاسبه شده که نتایج به طور خلاصه در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، به طور کلی، مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک حساسیت بیشتری به رطوبت نسبت به مخلوط کنترل دارند، که دلیل آن را

شده‌گی بلند مدت را می‌توان به سخت شده‌گی قیر ناشی از پیر شده‌گی نسبت داد. تحقیقات قبلی بر روی آسفالت‌های معمولی نیز نشان داده‌اند که پیر شده‌گی باعث افزایش مقاومت کششی [Islam et al. 2015] و افزایش مقاومت در برابر شیار شده‌گی و عمر خستگی در تنش ثابت می‌شود [Han et al. 2016; Presti, 2013]. با این وجود، همانگونه که در شکل نیز دیده می‌شود، در مخلوط حاوی ۱٪ پودر لاستیک به روش خشک و ۱۰٪ به روش تر، مقاومت کششی بعد از پیر شده‌گی کمتر از مقاومت کششی قبل از پیر شده‌گی است، ولی در هر دو حالت مقدار آنها از مخلوط کنترل بیشتر است. این موضوع را می‌توان به کمتر بودن اثر سخت شده‌گی در افزایش مقاومت کششی نسبت به اثر افزایش خاصیت جذب انرژی در درصد بهینه پودر لاستیک قبل از پیر شده‌گی ارتباط داد. نتایج ارائه شده در شکل ۸ همچنین نشان می‌دهند که در روش تر، مقاومت کششی بعد از پیر شده‌گی بلند مدت با افزایش درصد پودر لاستیک کاهش یافته، ولی در روش خشک، روند کاملاً برعکس بوده و با افزایش پودر لاستیک مقاومت کششی بعد از پیر شده‌گی بلند مدت افزایش می‌یابد. در این شرایط، بالاترین مقاومت کششی بعد از پیر شده‌گی برای مخلوط حاوی ۵٪ پودر لاستیک که به روش تر افزوده شده می‌باشد. در روش تر، به دلیل زمان تماس زیادتر پودر لاستیک با قیر داغ، جذب روغن‌های قیر توسط پودر لاستیک در این مدت صورت گرفته و تغییر چندانی در سختی در هنگام پیر شده‌گی رخ نمی‌دهد. با توجه به این که نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در دمای نسبتاً بالا در گرمخانه قرار می‌گیرند، با افزایش پودر لاستیک مقدار بیشتری از روغن‌های قیر جذب لاستیک شده و سختی بیشتر در مخلوط ایجاد می‌شود، که نتیجه آن افزایش مقاومت کششی با افزایش پودر لاستیک در روش خشک است.

شکل ۹ مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط رطوبتی را قبل و بعد از پیر شده‌گی بلند مدت برای مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف پودر لاستیک، که به دو روش تر و خشک به آن اضافه شده است، را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌

خواهد داشت. به طوری که، در درصد‌های پودر لاستیک ۵ و ۱۰٪ با روش تر مقدار نسبت کششی از حالت ۰/۵ و ۱٪ به روش خشک بیشتر بوده و حتی از حداقل مقدار مورد نیاز مشخصات فنی، که در شکل با خط چین نشان داده شده، نیز بیشتر است. اما، در درصد‌های بالا اختلاط به روش خشک نتایج بهتری را نشان می‌دهد. دلیل این موضوع افزایش ویسکوزیته قیر در درصد‌های بالای پودر لاستیک و کاهش پوشش سنگدانه‌ها و افزایش فضای خالی است که باعث افزایش نفوذ آب شده و آسیب رطوبتی را افزایش می‌دهد. بنابراین، در صورتی که با هدف استفاده بیشتر از مواد ضایعاتی بخواهیم از روش خشک برای افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی استفاده شود، بایستی مشکل حساسیت رطوبتی آن را مورد توجه قرار داد.

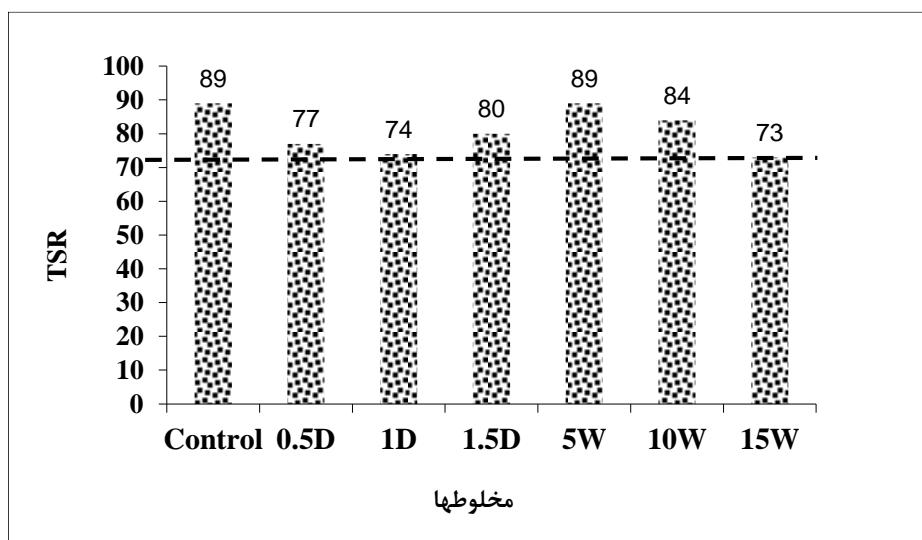
یکی از مسائل مهم مربوط به مخلوط‌های آسفالتی پیر شده‌گی است که به دلیل تغییرات ایجاد شده در ساختار شیمیایی قیرها در حین ساخت، اجرا و بهره‌برداری رخ می‌دهد. پیر شده‌گی معمولاً همراه با سخت شده‌گی و کاهش چسبندگی است و باعث تغییر در خصوصیات مکانیکی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. در این تحقیق، تاثیر پیر شده‌گی بر روی مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و آسیب رطوبتی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ نتایج آزمایش مقاومت کششی در حالت خشک را بر روی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک، که به روش خشک و تر به مخلوط افزوده شده‌اند، را قبل و بعد از پیر شده‌گی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، غیر از مخلوط‌هایی که حاوی درصد بهینه پودر لاستیک به روش تر و خشک هستند، در بقیه حالات مقاومت کششی مخلوط‌ها بعد از پیر شده‌گی بلند مدت بیشتر از مقاومت کششی قبل از پیر شده‌گی می‌باشد. به نظر می‌رسد، در درصد‌های بهینه پودر لاستیک وجود لاستیک باعث آزاد سازی کربن سیاه شده و اثر پیر شده‌گی را کاهش می‌دهد، که این موضوع در تحقیقات قبلی که بر روی اثر پیر شده‌گی روی قیر اصلاح شده با لاستیک انجام شده است نیز بیان شده است [Wang et al., 2016]. افزایش مقاومت کششی بعد از پیر

## بررسی حساسیت رطوبتی و پیر شدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی

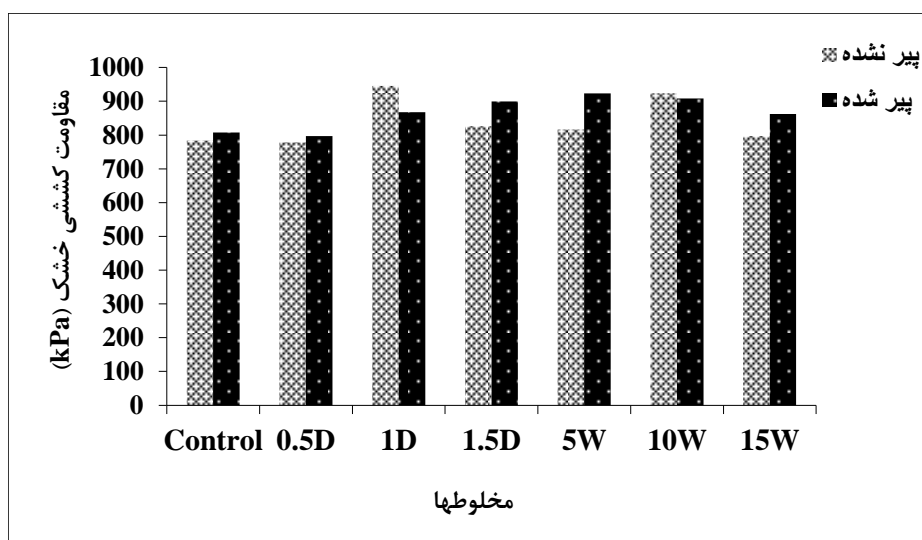
تر و خشک متفاوت است مرتبط است و نیاز به مطالعه و بررسی بیشتر دارد.

به منظور بررسی تاثیر پیر شدگی بر روی آسیب رطوبتی مخلوطهای حاوی درصدهای مختلف پودر لاستیک، نسبت مقاومت کششی نمونه های عمل آوری شده در شرایط رطوبتی به مقاومت کششی نمونه های خشک (TSR) محاسبه شده که نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک که به روش خشک افزوده شده است، دارای مقاومت بیشتری در برابر آسیب رطوبتی نسبت به مخلوط کنترل و مخلوطهای حاوی پودر لاستیک به روش تر هستند، و بیشترین نسبت مقاومت کششی مربوط به مخلوط حاوی ۱٪ پودر لاستیک به روش خشک است. همچنین، در مخلوطهای حاوی پودر لاستیک به روش تر، فقط مخلوط حاوی ۵٪ پودر لاستیک دارای مقاومت در برابر آسیب رطوبتی بیشتر از مخلوط کنترل می باشد. با اینحال، فقط مخلوط حاوی ۱۰٪ پودر لاستیک افزوده شده به روش تر حداقل نسبت مقاومت کششی مورد نیاز مشخصات فنی را که با خط چین در شکل نشان داده شده ارضاء نمی نماید. بنابراین، با توجه به این که نتایج مقاومت کششی خشک نشان داد که روش تر نتایج بهتری ارائه می کند، برای جبران ضعف و کاهش مقاومت کششی بیشتر در شرایط عمل آوری این مخلوطها از مواد ضد عریان شدگی استفاده گردد.

گردد، در مخلوط کنترل، مقاومت کششی در شرایط مرطوب بعد از پیر شدگی بلند مدت کاهش می یابد، اما، در مخلوطهای حاوی پودر لاستیک به روش خشک، مقاومت کششی نمونه های عمل آوری شده بعد از پیر شدگی بیشتر از آنها قبل از پیر شدگی است، و بیشترین مقاومت کششی نمونه های عمل آوری شده مربوط به مخلوط حاوی درصد بهینه پودر لاستیک (۱٪) است. همانگونه که قبلاً ذکر گردید، افزایش پودر لاستیک تا حد معینی باعث افزایش خاصیت جذب انرژی و مقاومت کششی می شود و بعد از آن، به دلیل جذب بیشتر روغن های قیر توسط لاستیک، مقاومت کششی کاهش می یابد. ضمناً ملاحظه می گردد که در مخلوطهای حاوی پودر لاستیک به روش خشک اختلاف مقاومت کششی نمونه های پیر شده و پیر نشده در حالت عمل آوری شده بیشتر از آن در حالت مقاومت کششی خشک است (شکل ۸) که نشان دهنده این است که پیر شدگی در مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک که با روش خشک به آنها اضافه گردیده است، باعث بهبود عملکرد در برابر رطوبت می گردد. همچنین، همانگونه که در شکل ۹ ملاحظه می گردد، در مخلوطهای حاوی پودر لاستیک به روش تر، غیر از درصد بهینه پودر لاستیک (۱۰٪)، در بقیه موارد، مشابه روش خشک، مقاومت کششی بعد از پیر شدگی بیشتر از مقاومت کششی قبل از پیر شدگی است. اما اثر بهبود دهنده پیر شدگی بر روی مقاومت کششی به اندازه روش خشک نیست. این اختلاف نیز به تفاوت در تغییرات ساختاری قیر و مخلوط که در دو روش



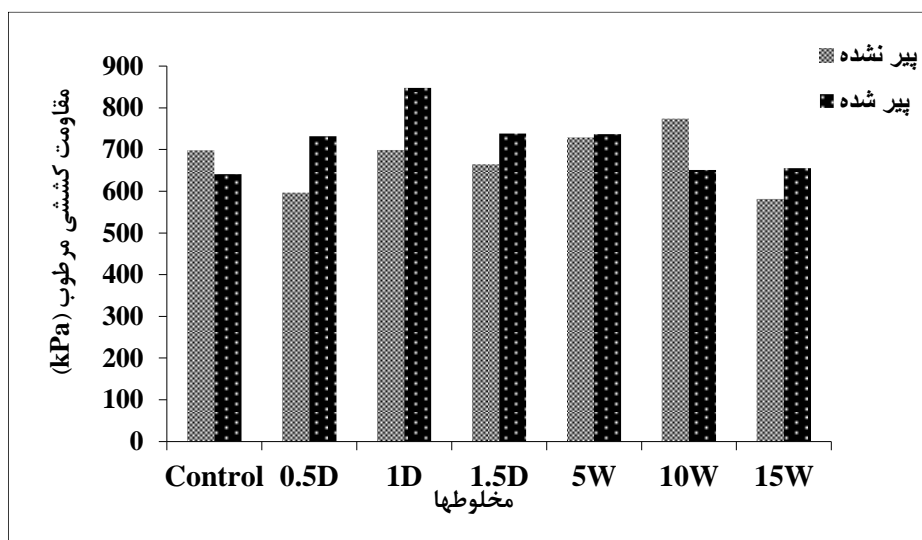
شکل ۷: نسبت مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک



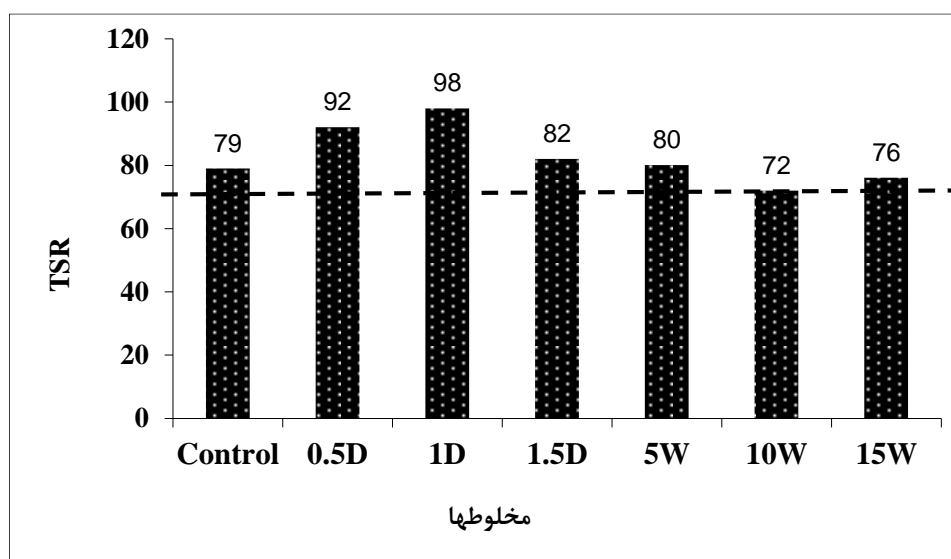
شکل ۸: مقاومت کششی خشک قبل و بعد از پیرشدگی در مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک افزوده شده به روش تر و خشک



## بررسی حساسیت رطوبتی و پیرشدگی بلند مدت بتن آسفالتی حاوی لاستیک ضایعاتی



شکل ۹. مقاومت کششی نمونه های عمل آوری شده قبل و بعد از پیرشدگی در مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک افزوده شده به روش خشک و تر



شکل ۱۰. نسبت مقاومت کششی مخلوطها بعد از پیرشدگی بلند مدت

## ۷. نتیجه گیری

- مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی با افزایش مقدار پودر لاستیک افزوده می شود تا حدی که بعد از آن از مقاومت کششی کاسته خواهد شد.
- در حالت خشک مقاومت کششی بیشتری از اختلاط پودر لاستیک به روش تر به دست می آید.
- درصد بهینه پودر لاستیک برای رسیدن به حداکثر مقاومت کششی در حالت خشک و عمل آوری شده برای اختلاط

در این تحقیق درصد های مختلفی از پودر لاستیک به دو روش تر و خشک به یک نوع بتن آسفالتی افزوده شده و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوطها در حالت خشک و عمل آوری شده در شرایط رطوبتی قبل و بعد از پیرشدگی بلند مدت ارزیابی گردید. در دامنه شرایط ارزیابی شده در این تحقیق نتایج کلی زیر قابل استخراج است.

-Abdelrahman, M., Carpenter, S. (1999) "Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier", Transportation Research Record Board, Board 1661, pp 106-113.

-Airey, G. D.; Rahman, M.; Collop, A. C. (2004) "Crumb rubber and bitumen interaction as a function of crude source and bitumen viscosity" Road Materials and Pavement Design, Vol.5, No.4, pp. 453-475.

-Amirkhanian, S. N. (2001). Utilization of crumb rubber in asphaltic concrete mixtures-south carolina's experience" South Carolina Department of Transportation, South Carolina, USA.

-Arabani, M.; Tahami, S. A.; Hamedi, G. H. (2018)"Performance evaluation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures with nano-material", Road Materials and Pavement Design, Vol. 9, No. 5, pp. 1241-1258.

-Bell, C. A., AbWahab, Y., Cristi, M. E. and Sosnovske, D. (1994) "Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures" (No. SHRP-A-383). Strategic Highway Research Program.

-Buncher, M. S. (1995) "Evaluating the effects of the wet and dry processes for including crumb rubber modifier in hot mix asphalt", Auburn, Alabama; Auburn University.

-Cao, W. (2007) "Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixture using dry process", Construction and Building Material, Vol. 17, No. 1, pp.1011-1015.

-Ding, X.; Ma, T.; Zhang, W.; Zhang, D. (2017)"Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixtures", Construction and Building Materials, Vol. 157, pp. 975-981. ETRMA statistics [http://www.etrma.org/pdf/20101220%20Brochure%20ELT\\_2010\\_final%20version.pdf2012](http://www.etrma.org/pdf/20101220%20Brochure%20ELT_2010_final%20version.pdf2012).

- Feiteira Dias, J. L.; Picado-Santos, L. G.; Capitaõ, S. D. (2014) "Mechanical performance

به روش خشک ۱٪ وزن کل مخلوط، و در روش تر ۱۰٪ کل وزن قیر است، که به ازای آنها مقاومت کششی در حالت خشک به ترتیب ۲۰ و ۱۸٪ بیش از مخلوط کنترل است.

• مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک کمتر از مخلوط کنترل است، و از این نظر، اختلاط به روش تر نتایج بهتری از روش اختلاط خشک ارائه می دهد. مخلوط های حاوی مقادیر بهینه پودر لاستیک به روش تر و خشک نسبت مقاومت کششی ۸۴ و ۷۴٪ را نتیجه می دهند.

• به طور کلی پیر شدگی باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی می شود، اما، در مخلوطهای حاوی مقدار بهینه از پودر لاستیک مقاومت کششی بعد از پیر شدگی کمتر از مقاومت کششی قبل از پیر شدگی است.

• در مخلوطهای حاوی پودر لاستیک که به روش تر افزوده شده، با افزایش درصد پودر لاستیک مقاومت کششی خشک و عمل آوری شده بعد از پیر شدگی کاهش یافته و در مخلوطهای حاوی پودر لاستیک که به روش خشک افزوده شده، مقاومت کششی بعد از پیر شدگی با افزودن پودر لاستیک افزایش می یابد، که نشان دهنده کاهش تاثیر پیر شدگی بر قیر در حالتی است که لاستیک به روش تر به مخلوط اضافه شده اند.

• برای مخلوطهای پیر شده بلند مدت، مخلوطهای حاوی پودر لاستیک که به روش خشک افزوده شده دارای مقاومت بیشتری در برابر آسیب رطوبتی نسبت به مخلوط کنترل و مخلوطهای حاوی پودر لاستیک به روش تر هستند.

## مراجع

-دانش، الف، اکبری نسرکانی، ع. الف، سراجی، م و افلاکیان، الف. (۱۳۹۶) "خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک و گوگرد با پوشش پلیمری" مجله مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره دوم، ص. ۲۰۷-۱۸۹.

- Liseane, P., Glicerio, T., Jorge, T. et al., (2010) "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1193–1200.
- Moreno, F.; Rubio, M. C.; Martinez-Echevarria, M. J. (2011) "Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 5, pp 2323–2334.
- Morris, G. R., Carlson, D. D. (2001) "The apparent unique behavior of thin asphalt rubber hot-mix overlays in Arizona. Beneficial use of recycled materials in transportation applications" *Air and Waste Management Association*, Arlington, Virginia, November 13-15, 2001, pp. 651-666.
- Navarro, F. J.; Partal, P.; Martinez-Boza, F.; Gallegos, G. (2005) "Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen", *Energy Fuels*, Vol. 19, No. 5, pp. 1984–1990.
- Neto, S. A. D.; Farias, M. M.; Pais, J. C.; Pereira, P. A.; Sousa, J. B. (2006) "Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders", *Road Materials and Pavement Design*, Vol.7, No. 2, pp. 131–148.
- Nguyen, H. T. and Tran, T. N. (2018) "Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process" *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 11, No.3, pp. 236-244.
- Papagianakis, A. T. and Lougheed, T. J. (1995) " A review of crumb-rubber modified asphalt concrete technology" Final report, Washington State department of Transportation, WA, RD 379.1.
- Partl, M. N., Pasquini, E., Canestrari, F. and Virgili, A. (2010) "Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 3, pp. 283-291.
- of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network", *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp. 247–254.
- Han, L., Zheng, M., Wang, C. (2016) "Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 128, pp.399-405.
- Hernáñez-Olivares, F.; Witoszek-Schultz, B; Alonso-Fernández, M.; Benito-Moro, C. (2009) "Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 277–288.
- Hossain, Z., Bairgi, B. and Belshe, M., (2015) "Investigation of moisture damage resistance of GTR-modified asphalt binder by static contact angle measurements", *Construction and Building Materials*, Vol. 95, pp. 45-53.
- Islam, M. R., Hossain, M. I. and Tarefder, R. A. (2015) "A Study of Asphalt Aging Using Indirect Tensile Strength Test." *Construction and Building Materials*, Vol. 95, pp.218-223.
- Lastra-González, P.; Calzada-Pérez, M. A.; Castro-Fresno, D. Vega-Zamanillo, A.; Indacochea-Vega, I. (2016) "Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste", *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 1133–1140.
- Lawrence, C. E., Killackey B. J. and Lynch, D. F. (1991) "Experimental hot mix pavement with scrap tire rubber at Thamesville" Ontario, Ontario Ministry of Transportation, Report 1.
- Lee, S. J.; Akisetty, C. K.; Amirkhanian, S. N. (2008) "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 7, pp. 1368–1376.

Engineering Journal, Vol. 22, No. 3, pp. 181-193.

-Venudharan, V. and Biligiri, K. P. (2016b) "Conceptualization of permanent deformation characteristics of rubber modified asphalt binders: energy-based algorithm and rheological modeling", Construction and Building Materials, Vol. 126, pp. 388-397.

-Venudharan, V. and Biligiri, K. P. (2016a) "Statistical evaluation of crumb rubber modification procedure in asphalt binder modification, in: 2nd IRF Asia Regional Congress & Exhibition, Kuala Lumpur, Malaysia, 16-20 October 2016 (Conference Proceedings).

-Venudharan, V. and Biligiri, K. P. (2017a) "Heuristic principles to predict the effect of crumb rubber gradation on asphalt binder rutting performance", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 29, No. 8, pp. 115-124.

-Venudharan, V. and Biligiri, K. P. (2017b) "Effect of crumb rubber gradation on asphalt binder modification: Rheological evaluation, optimization and selection", Materials and Structure, Vol. 50, No. 2, pp. 78-86.

- Venudharan, V.; Biligiri, K. P. and Das, N. C. (2018) "Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermochemical approach", Construction and Building Materials, Vol. 181, pp.455-464.

-Wang, Q, Li, S.; Wu, X. and Quyang, C. (2016) "Weather aging resistance of different rubber modified asphalt", Construction and Building Materials, Vol. 106; pp. 443-448.

-Xiao, F., Amirkhani, S. N., Shen, J. and Putman, B. (2009) "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures", Construction and Building Materials, Vol. 23, No.2, pp. 1028-1034.

-Pasquini, E., Canestrari, F. and Cardone, F. (2011) "Performance evaluation of gap graded asphalt rubber mixtures" Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 2014-2022.

-Pereze, I. and Pasandin, A. R. (2017) "Moisture damage resistance of hot mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber", Journal of Cleaner Production, Vol. 165, pp. 405-414.

-Presti, D. L. (2013) "Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review" Journal of Construction and Building Materials, Vol. 49, pp. 863-881.

-Punith, V. S., Suresha, S. N., Raju, S., Bose, S., Veeraragavan, A. (2012) "Laboratory investigation of open-graded friction-course mixtures containing polymers and cellulose fibers", Journal of Transportation Engineering, Vol. 38, No. 1, pp. 67-74.

-Sharma, V. and Goyal, S. (2006) "Comparative study of performance of natural fibres and crumb rubber modified stone matrix asphalt mixtures", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, No. 2, 134-139.

-Shook, J. F. (1990) "Experimental construction of rubber modified asphalt pavements in New York State" New York Department of Transportation Research Report.

-Sobhy, A.; Pires, M. G.; Presti, D. L. and Airey, G. D. (2018) "The effects of laboratory aging on rheology and fracture characteristics of different rubberized bitumens", Construction and Building Materials; Vol. 180; pp. 188-198.

-State of California. Department of Transportation, (2006) "Asphalt rubber usage guide Materials Engineering and Testing Services", California: Department of Transportation

-Unsiwilai, S. and B. Sangpetngam (2018) "Influences of particle size and content on deformation resistance of crumb rubber modified asphalt using dry process mix",

Construction and Building Materials, Vol. 104; pp. 230–234.

-Ziari, H.; Goli, A. and Amini, A. (2016) "Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28, No.12, pp. 234-243.

- Xiao, F. and Amirghanian, S. N. (2009) " Laboratory investigation of moisture damage in rubberised asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 319-328.

- Xie, Z. and Shen, J. (2016) "Performance properties of rubberized stone matrix asphalt mixtures produced through different processes",

## حسن طاهرخانی - حسین بیات - حمیدرضا اکبری

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم و صنعت 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 تحلیل، طراحی و مصالح روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان است.



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.



حمیدرضا اکبری درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد بیرجند اخذ نموده و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران راه و ترابری را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه آزاد واحد زنجان اخذ نمود و در حال حاضر مشغول فعالیت در بخش خصوصی در شهر مشهد است.