

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

سید امیرحسین بهشتی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

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

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

علیرضا سرکار، استادیار گروه راه و ترابری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پرهام حیاتی، استادیار گروه راه و ترابری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

چکیده

در این تحقیق تاثیر جنس مصالح سنگی بر پیرشدگی قیر در مخلوطهای آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی، تحت شرایط پیرشدگی کوتاه مدت، بلند مدت ۵ روزه و بلند مدت ۷ روزه قرار گرفته و مشخصات مارشال، مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی آنها ارزیابی شده و با یکدیگر و حالت کنترل بدون اعمال پیرشدگی مقایسه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی استقامت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت کششی بیشتر و حساسیت رطوبتی کمتری نسبت به مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی دارند و تفاوت در حساسیت رطوبتی دو نوع مخلوط در مخلوطهای پیرشده بیشتر می‌باشد. همچنین، نتایج بیانگر این است که پیرشدگی باعث افزایش استقامت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت کششی در حالت خشک مخلوطها می‌گردد و روانی مخلوطها را کاهش می‌دهد، اما باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوطها می‌گردد. تاثیر پیرشدگی بر مقاومت کششی مخلوطها بیشتر از آن بر خصوصیات مارشال می‌باشد. استقامت مارشال و مقاومت کششی بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت ۷ روزه بر روی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی، به ترتیب، ۱۳ و ۶۲٪ نسبت به مخلوط پیر نشده افزایش می‌یابد و این مقادیر برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی، به ترتیب، ۱۷ و ۳۲٪ می‌باشد. تاثیر پیرشدگی بر مشخصات مارشال و حساسیت رطوبتی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی بیشتر از مخلوطهای با مصالح سنگی آهکی است، اما، تاثیر آن بر مقاومت کششی در حالت خشک در مخلوطهای با مصالح سنگی آهکی بیشتر است.

کلمات کلیدی: بتن آسفالتی، پیرشدگی، مصالح سنگی آهکی، مصالح سنگی سیلیسی، حساسیت رطوبتی

۱. مقدمه

خرابی‌ها زود هنگام رخ ندهد همواره از اهداف مهندسیین روسازی بوده است. یکی از عوامل موثر در طرح اختلاط شناخت و ارزیابی ویژگی‌های اجزای تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی از جمله قیر و مصالح سنگی می‌باشد. سنگدانه‌ها که حدود ۸۵ تا ۹۰٪ از حجم و حدود ۹۵٪ از وزن مخلوطهای آسفالتی را تشکیل می‌دهند، استخوان بندی اصلی مخلوط آسفالتی را تشکیل داده و عامل مهمی در سختی و مقاومت به شیارشدگی مخلوط آسفالتی هستند، و مشخصات و ویژگی‌های آنها تاثیر زیادی بر روی عملکرد مخلوطهای آسفالتی دارد. خصوصیتی مثل بافت سطحی، شکستگی، شکل دانه‌ها، کانی-شناسی، سختی، دانه‌بندی، میزان قلیایی یا اسیدی بودن از مهمترین ویژگی‌های سنگدانه‌ها هستند که بر عملکرد مخلوطهای آسفالتی شامل مقاومت به شیارشدگی، آسیب رطوبتی، مقاومت به ترک خوردگی و مقاومت لغزندگی موثر می‌باشند (Li et al., 2021; Gao et al., 2018; Bessa et al., 2015). اندرکنش بین سنگدانه‌ها و قیر تاثیر زیادی بر روی عملکرد ماستیک قیری و مخلوط آسفالتی دارد (Ensley and Scholz, 1972; Ensley, 1973; Curtis, 1993; Lesueur and Little, 1998; Yan and Liang, 2001; Kim et al., 2003; Hashimoto et al., 2011; Xiao et al., 2004). اندرکنش بین سنگدانه و قیر ناشی از فرآیندهای پیچیده فیزیکی-شیمیایی بوده و به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله خصوصیت اسیدی-بازی و ویژگی‌های سطحی سنگدانه‌ها و اجزا و خصوصیات قیر. خصوصیات سنگدانه‌ها به مقدار زیادی بر روی اندرکنش قیر و سنگدانه موثر بوده و سنگدانه‌های قلیایی، سطح مخصوص بزرگتر، انرژی سطحی بیشتر و بافت سطحی زبرتر سنگدانه‌ها سودمند می‌باشند (Chen and Tan 2007, You and Dai 2011, 2007a, 2007b, Liu and You 2011).

قیر با وجود این که درصد وزنی کمی از بتن آسفالتی را تشکیل می‌دهد وظیفه چسباندن سنگدانه‌ها به یکدیگر را داشته و عامل مهمی در میزان سختی، مقاومت به تغییر شکل و مقاومت به

به دلیل ارائه سطحی انعطاف پذیر، با سر و صدای کم، مقاومت به لغزندگی قابل قبول، همچنین سختی، مقاومت سازه‌ای و دوام کافی، روسازی آسفالتی رایج‌ترین نوع روسازی مورد استفاده در سراسر دنیا می‌باشد (Taherkhani et al., 2021). در ایالات متحده آمریکا ۹۰٪ راههای روسازی شده از نوع آسفالتی می‌باشند (Barbieri et al., 2019; Saghafi et al., 2019). در ایران نیز به دلیل وجود منابع نفتی، استفاده از روسازی آسفالتی از گذشته تا به حال رایج بوده و نوع غالب روسازی می‌باشد. در این نوع روسازی از مخلوطهای آسفالتی در لایه‌های فوقانی استفاده شده و در لایه‌های زیرین معمولاً از مصالح سنگدانه‌ای نچسبیده^۱ استفاده می‌گردد. یکی از انواع رایج مخلوطهای آسفالتی بتن آسفالتی می‌باشد که متشکل از سنگدانه‌های درشت و ریز، قیر، فیلر و فضای خالی می‌باشد (Wang et al., 2020; Tao et al., 2019; Chang et al., 2020) و از آن در لایه‌های فوقانی روسازی‌ها به طور گسترده‌ای در دنیا استفاده می‌گردد. یک بتن آسفالتی خوب باید سختی و مقاومت، دوام، کارایی، انعطاف پذیری و مقاومت به ترک خوردگی مناسبی داشته باشد (Heitzman, 2007; Christopher et al., 2011). مخلوطهای آسفالتی مستعد بروز انواع مختلفی خرابی‌ها می‌باشند که متاثر از عوامل مختلفی از جمله بارگذاری ترافیکی، عوامل محیطی، مشخصات مواد تشکیل دهنده و شرایط ساخت و اجرای آن می‌باشند. از جمله این خرابی‌ها شیارشدگی یا تغییر شکل پلاستیک، ترک خوردگی حرارتی و خستگی و آسیب رطوبتی می‌باشند. بروز زودتر از موعد این خرابی‌ها باعث هدر رفتن مصالح و انرژی مورد استفاده در تولید و اجرا شده و از نظر زیست محیطی و اقتصادی قابل قبول نمی‌باشد. همچنین، بروز این خرابی‌ها باعث کاهش ایمنی روسازی شده و بر کیفیت رانندگی و هزینه‌های استفاده کنندگان از روسازی نیز موثر می‌باشند. به همین دلیل، طرح اختلاط مناسب مخلوطها برای این که این

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

شکل پذیری قیر، شکنندگی مخلوط آسفالتی بیشتر شده و مقاومت آن در برابر ترک خوردگی کاهش می یابد (Lopez-Montero and Miro, 2016). شبیه سازی پیرشدگی قیر در آزمایشگاه را می توان به دو دسته کلی آزمایشهای پیرشدگی بر روی قیر و آزمایشهای پیرشدگی بر روی مخلوطهای آسفالتی تقسیم کرد. آزمایشهای پیرشدگی بر روی قیر شامل آزمایش لایه نازک چرخشی^۴ (RTFOT) و لعاب نازک قیر^۵ (TFOT) برای پیرشدگی کوتاه مدت و آزمایش پیرشدگی تسریع شده در ظرف تحت فشار^۶ (PAV) برای ارزیابی پیرشدگی بلند مدت می باشند (Azimi Alamdari et al., 2019). در آزمایشهای پیرشدگی بر روی مخلوطها، معمولاً، نمونه های سست یا متراکم شده از مخلوط آسفالتی به مدت معینی در دمای مشخصی در داخل گرمخانه قرار می گیرند. مطابق توصیه موسسه آشتو و طبق استاندارد AASHTO R30، مخلوطهای آسفالتی سست به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار می گیرند تا شرایط پیرشدگی کوتاه مدت در حین فرایند ساخت و تراکم مخلوط آسفالتی را شبیه سازی نمایند، و برای شبیه سازی پیرشدگی بلند مدت، مخلوطهای متراکم به مدت ۵ روز در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار می گیرند. با توجه به گرایان اکسیداسیون در جهت قطر و ارتفاع در نمونه های متراکم (Houston et al., 2005)، برخی از محققین استفاده از مخلوط سست را برای پیرشدگی بلند مدت توصیه نموده اند (Von Quintus et al., 1988; Alwardany et al., 2017). اما، مشکل این روش سخت شدن مخلوط در حین پیرشدگی در حالت سست و سخت بودن متراکم نمودن آنها می باشد (Read, 2010). از فاکتورهای مهم در پیرشدگی بلند مدت مخلوطهای آسفالتی برای شبیه سازی دقیقتر پیرشدگی در حین بهره برداری دمای مورد استفاده و زمان پیرشدگی است. یکی از اشکالاتی که به روش استاندارد AASHTO R30 گرفته می شود این است که در این استاندارد دمای واحد ۸۵ درجه سانتیگراد برای همه

ترک خوردگی در مخلوطهای آسفالتی می باشد. قیر یک ماده آلی بوده که از نفت خام تهیه شده و ساختار آن متشکل از انواع مختلفی از مولکولهای هیدروکربن می باشد. همانند بسیاری از مواد آلی، خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی قیر با زمان به طور تدریجی تغییر می نماید که به نام پیرشدگی شناخته می شود (Baghaee Moghaddam and Baaj, 2016). مهمترین مکانیزمهای پیرشدگی در قیر شامل سخت شدن فیزیکی، تبخیر روغنهای سبک در قیر و اکسیداسیون می باشند که باعث تغییر خواص رئولوژی آن می گردند (Petersen, 2009). پیرشدگی در قیر در حین فرایند تولید آسفالت و در هنگام بهره برداری از روسازی رخ می دهد که به اولی پیرشدگی کوتاه مدت^۱ و به دومی پیرشدگی بلند مدت^۲ اطلاق می شود. پیرشدگی کوتاه مدت به علت دمای بالا (بیش از ۱۵۰ درجه سانتیگراد) که در دوره تولید، اختلاط، حمل، پخش و تراکم رخ می دهد، عمدتاً متأثر از اکسیداسیون سریع قیر، تبخیر و فرار روغن موجود در قیر در اثر گرما و کاهش ترکیبات روغنی از طریق جذب شدن توسط سنگدانه ها رخ می دهد. در فرایند پیرشدگی کوتاه مدت لایه خیلی نازکی از قیر در دمای بالا در معرض هوا قرار گرفته و منجر به تغییرات قابل توجه در خصوصیات قیر می گردد. پیرشدگی بلند مدت با سرعت کم در طول عمر خدمت دهی روسازی و بیشتر در لایه های فوقانی اتفاق می افتد؛ فرایند جذب اتم های اکسیژن توسط اجزای قیر به ویژه آسفالتین ها و رزین ها است. اکسیداسیون قیر یک فرایند برگشت ناپذیر است. از آنجایی که اکسیداسیون به وجود اکسیژن و دسترسی به آن در مخلوط بستگی دارد، درصد فضای خالی، ضخامت لایه مخلوط آسفالتی، مقدار قیر و وجود ترک عواملی هستند که بر مقدار قیر هوازده و مقدار بالقوه قیر پیر شده تأثیرگذار هستند. به طور کلی، پیرشدگی قیر منجر به افزایش سختی مخلوط شده و قابلیت باربری و مقاومت به تغییر شکل دائمی آن را افزایش می دهد. اما، به دلیل کاهش

مختلف حاوی مقادیر متفاوت سولفور آهن بودند را در شرایط مختلف پیرشدگی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که اثر منبع سنگ بر روی پیرشدگی قیر قابل توجه می‌باشد (Azimi Alamdari et al., 2021). بنابراین، مطالعه تاثیر جنس سنگدانه‌ها بر میزان پیرشدگی قیر دارای اهمیت می‌باشد.

بررسی تحقیقات قبلی نشان دهنده این است که مشخصات مصالح سنگی تاثیر مهمی بر ویژگی‌های مخلوطهای آسفالتی دارند. اما، بخشی از این موضوع که به درستی و کافی مورد مطالعه قرار نگرفته است تاثیر مشخصات مصالح سنگی بر روی پیرشدگی مخلوطهای آسفالتی است. به همین دلیل، در این تحقیق هدف اصلی تعیین میزان تاثیر جنس سنگدانه‌ها بر پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت مخلوطهای آسفالتی می‌باشد. همچنین، پیرشدگی بلند مدت در دو سطح ۵ و ۷ روزه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت که نوآوری این تحقیق این است که اثر تغییر در مشخصات مخلوط آسفالتی ساخته شده با دو نوع مصالح سنگی مختلف بعد از اعمال شرایط مختلف پیرشدگی مشخص می‌گردد. ضمن مقایسه خصوصیات مخلوط آسفالتی ساخته شده با دو نوع سنگدانه رایج در کشور، تاثیر زمان پیرشدگی بر این خصوصیات نیز مطالعه می‌گردد. دو نوع مصالح سنگی با منشاء آهکی و سیلیسی که به طور رایج در کشور برای تولید مخلوطهای آسفالتی استفاده می‌شوند انتخاب شده و نمونه‌های آسفالتی با نوع و مقدار قیر یکسان با آنها ساخته شده و تحت شرایط مختلف پیرشدگی قرار گرفته و ویژگی‌های مقاومت و دوام مخلوطها در حالات مختلف پیرشدگی ارزیابی شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲. روش پژوهش

۲-۱ مواد و مصالح مورد استفاده در تحقیق

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل دو نوع مصالح سنگی و یک نوع قیر می‌باشد. مصالح سنگی آهکی از معدن بناب و

شرایط محیطی استفاده می‌شود. اما، در برخی مناطق گرمسیر که آسفالت دماهای بالایی را تجربه می‌کند پیرشدگی بیشتری در حین بهره‌برداری رخ می‌دهد (Sirin et al., 2018). همچنین، محققین مختلفی در پی یافتن ارتباطی بین شرایط پیرشدگی آزمایشگاه با پیرشدگی در محل روسازی بوده‌اند. بل و همکارانش عمل‌آوری در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲ روز یا ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ روز را برای شبیه سازی پیرشدگی روسازی برای عمر ۱ تا ۳ سال بهره‌برداری و دمای ۸۵ درجه به مدت ۴ تا ۸ روز و ۱۰۰ درجه به مدت ۲ تا ۴ روز را برای شبیه سازی پیرشدگی بلند مدت روسازی با عمر ۹ تا ۱۰ سال را پیشنهاد داده‌اند (Bell et al., 1994). براون و اسکولز دریافتند که اعمال شرایط پیرشدگی به مدت ۴ روز و دمای ۸۵ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌های متراکم شبیه‌سازی پیرشدگی به مدت ۱۵ سال در روسازی در شرایط کشور انگلستان می‌باشد (Brown and Scholz, ۲۰۰۰). سیرین و همکارانش دریافتند که اعمال شرایط پیرشدگی در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۴۵ روز بر روی نمونه‌های متراکم و یا ۲ تا ۳ روز در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌های سست شبیه سازی پیرشدگی در مدت ۵ سال مخلوط آسفالتی در رویه روسازی در شرایط کشورهای خاور میانه می‌باشد (Sirin et al., 2018). در آزمایشهای ارزیابی پیرشدگی قیر فرض می‌شود که سنگدانه‌ها خنثی بوده و تاثیری روی اکسیداسیون قیر ندارند. اما، این فرض در خیلی از موارد درست نیست و به خوبی شناخته شده است که مصالح خاص به ویژه ترکیبات فلزی اثر کاتالستی روی فرآیند پیرشدگی دارند (Azimi Alamdari et al., 2019). سولفید آهن در اغلب منابع تولید سنگدانه‌ها به شکل‌های مختلفی مثل پیریت و پیرهوتیت موجود است، که می‌تواند بر روی پیرشدگی قیر موثر باشند (Hesp and Shurvell, 2010; Mouton, 2006; Petersen, 2009). عظیمی علمداری و همکارانش پیرشدگی قیر در مخلوطهای آسفالتی که با سنگدانه‌ها از منابع

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

ترکیبات اکسید سیلیس (SiO_2) و اکسید کلسیم (CaO) دارای اهمیت می‌باشند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مصالح سنگی سیلیسی دارای مقدار بیشتر از اکسید سیلیس بوده و مصالح سنگی آهکی دارای مقدار بیشتر از اکسید کلسیم می‌باشند. قیر مصرفی در این تحقیق، قیر PG58-22 تولید شده در شرکت نفت پاسارگاد می‌باشد. مشخصات فنی قیر استفاده شده بر اساس نتایج اعلام شده آزمایشگاه شرکت ایمن راه ایتار تبریز مطابق جدول ۶ می‌باشد.

مصالح سنگی سیلیسی از معدن سارمساقلودر استان زنجان تهیه گردیده‌اند. جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی آهکی و جدول ۲ مشخصات فنی مصالح سنگی سیلیسی را نشان می‌دهد. جدول ۳ و ۴ نیز، به ترتیب، چگالی و جذب آب مصالح سنگی آهکی و سیلیسی را نشان می‌دهند. آنالیز طیف سنجی فلورسانس (XRF) به منظور تعیین ترکیبات شیمیایی موجود در مصالح سنگی آهکی و سیلیسی بر روی نمونه‌های پودر از این نوع مصالح سنگی انجام گرفت، که نتایج آن در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد. از نظر حساسیت به رطوبت و پیوند با قیر

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی آهکی

| نتایج آزمایش | | روش آزمایش | مشخصه |
|------------------------------|---------------------------------|-------------|---|
| ریزدانه | درشت دانه | | |
| - | ۲۹ | AASHTO-T96 | درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس انجلس |
| ۷۵ | - | AASHTO-T176 | ارزش ماسه‌ای |
| - | در یک جبهه ۱۰۰ در دو جبهه ۹۹ | ASTM -D5821 | درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ |
| - | ۲۰ | - | درصد سیلیس مصالح سنگی |
| - | ۱۹ | BS-812 | درصد تورق |
| ۳,۵۹ | - | AASHTO-M6 | ضریب نرمی ماسه |
| ۱ | ۱ | AASHTO-T104 | درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم |
| جدایی لایه قیر مشاهده نگردید | | ASTM-D1664 | درصد اندود به قیر مصالح سنگی |
| دارد | ندارد | ASTM-D4791 | درصد دانه‌های پهن و دراز |
| ۴۴,۴ | - | ASTM-C1252 | درصد گوشه داری ریزدانه |

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی سیلیسی

| نتایج آزمایش | | روش آزمایش | مشخصه |
|--------------|--------------------------------|-------------|---|
| ریزدانه | درشت دانه | | |
| - | ۱۶ | AASHTO-T96 | درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس انجلس |
| ۵۱ | - | AASHTO-T176 | ارزش ماسه‌ای |
| - | در یک جبهه ۹۸ در دو جبهه ۹۶ | ASTM -D5821 | درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ |
| - | ۵۰,۷ | - | درصد سیلیس مصالح سنگی |
| - | ۱۵ | BS-812 | درصد تورق |

| نتایج آزمایش | | روش آزمایش | مشخصه |
|------------------------------|-----------|-------------|------------------------------------|
| ریزدانه | درشت دانه | | |
| ۳,۷۶ | - | AASHTO-M6 | ضریب نرمی ماسه |
| ۰ | ۱ | AASHTO-T104 | درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم |
| جدایی لایه قیر مشاهده نگردید | | ASTM-D1664 | درصد اندود به قیر مصالح سنگی |
| دارد | ۰,۹ | ASTM-D4791 | درصد دانه‌های پهن و دراز |
| ۳۷,۷ | - | ASTM-C1252 | درصد گوشه داری ریزدانه |

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

| جذب آب (%) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | | مشخصه |
|------------|---------------------------------|-------|--|
| | حقیقی | ظاهری | |
| ۰,۸ | ۲,۶۵ | ۲,۷۱ | مصالح سنگی مانده روی الک ۸ |
| ۱,۲ | ۲,۶۵۲ | ۲,۷۳ | مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰ |
| - | ۲,۷۶ | | مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ |
| | ۲,۶۵۹ | | وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی Gsb (gr/cm ³) |

جدول ۴. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی سیلیسی

| جذب آب (%) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | | مشخصه |
|------------|---------------------------------|-------|--|
| | حقیقی | ظاهری | |
| ۲ | ۲,۶۴۲ | ۲,۷۸۶ | مصالح سنگی مانده روی الک ۸ |
| ۲,۵ | ۲,۶۲۳ | ۲,۸۰۵ | مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰ |
| - | ۲,۶۹۱ | | مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ |
| | ۲,۶۳۸ | | وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی Gsb (gr/cm ³) |

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سیلیسی

| Fe ₂ O ₃ | MnO | TiO ₂ | K ₂ O | So ₃ | P ₂ O ₅ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO | MgO | Na ₂ O | ترکیبات |
|--------------------------------|------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|-------------------|--------------|
| ۶,۶۴ | ۰,۲۲ | ۱,۱۳ | ۴,۱ | ۰,۵ | ۰,۱۷ | ۱۴,۶۶ | ۵۰,۷ | ۸,۲ | ۲,۱۷ | ۱,۳ | مصالح سیلیسی |
| ۰,۳۷ | ۰,۰۳ | ۰,۱۱ | ۰,۱۹ | ۰,۰۷ | ۰,۰۸ | ۰,۷۲ | ۲۰ | ۴۶,۳ | ۵,۸۳ | ۰,۰۴ | مصالح آهکی |

جدول ۶. مشخصات قیر مورد استفاده در پژوهش

| مشخصه | روش آزمایش | نتیجه | حدود آیین‌نامه |
|---|-------------|-------|----------------|
| درجه اشتعال (°C) | AASHTO-T48 | ۲۹۲ | حداقل ۲۳۰ |
| ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد (Pa.s) | AASHTO-T316 | ۰,۳۰۱ | حداکثر ۲Pa.s |

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

| مشخصه | روش آزمایش | نتیجه | حدود آیین نامه |
|---|-------------|-------|----------------|
| $G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر نشده (kPa) | AASHTO-T315 | ۲,۳۸ | حداقل ۱ |
| $G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر شده کوتاه مدت (kPa) | AASHTO-T315 | ۴,۴۱ | حداقل ۲,۲ |
| افت وزنی بعد از آزمایش لعاب نازک چرخشی % | AASHTO-T240 | ۰,۲۳۸ | حداکثر ۱٪ |
| $G^*\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر شده بلند مدت (kPa) | AASHTO-T315 | 3790 | حداکثر ۵۰۰۰ |
| سختی خزشی در آزمایش رئومتر تیر خمشی در دمای -12°C (Mpa) | AASHTO-T313 | ۱۱۶ | حداکثر ۳۰۰ |
| مقدار ضریب m در آزمایش رئومتر تیر خمشی | AASHTO-T313 | ۰,۳۰۱ | حداقل ۰,۳ |

۲-۲ برنامه آزمایشها، طرح اختلاط و ساخت

نمونه‌ها

در این تحقیق تاثیر جنس مصالح سنگی بر روی خاصیت پیرشدگی قیر در مخلوط آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است. دو نوع مصالح سنگی شامل مصالح سنگی آهکی و سیلیسی انتخاب گردیده و با هر کدام از این مصالح سنگی و قیر مشابه از نوع PG58-22 نمونه‌های آسفالتی تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مخلوطها در ۴ حالت، شامل بدون اعمال پیر شدگی، با اعمال پیرشدگی کوتاه مدت، و اعمال پیر شدگی بلند مدت در دو حالت ۵ و ۷ روزه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شکل ۱ فلوجارت برنامه تحقیق را نشان می‌دهد. طرح اختلاط مخلوطها با روش مارشال و مطابق با استاندارد ASTM D1559 انجام گرفت. به منظور جلوگیری از خطای ایجاد شده ناشی از ضخامت لایه قیر بر روی سنگدانه در نتایج پیر شدگی از مقدار قیر یکسانی در هر دو مخلوط استفاده گردید. دانه بندی مصالح سنگی مطابق دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ با حداکثر اندازه اندازه ۱۹ میلیمتر در نظر گرفته شد. شکل ۲ دانه بندی آیین نامه و مخلوطهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. درصد قیر بهینه برای مخلوطها ۵,۶٪ تعیین گردیده است. نمونه های آسفالتی استوانه ای به روش مارشال در اندازه های با قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع تقریبی ۶۲,۵ میلیمتر با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف ساخته شدند. شرایط

پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت مخلوطهای آسفالتی مطابق با استاندارد AASHTO-R30 اعمال گردید. مطابق این استاندارد، جهت شبیه سازی پیرشدگی کوتاه مدت، مخلوط غیرمتراکم در ضخامت بین ۲۵ تا ۵۰ میلی متر 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 شبیه سازی پیرشدگی بلند مدت نیز ابتدا نمونه‌های سستی که در مرحله قبلی پیر شده بودند، بلافاصله متراکم شده و در همان گرمخانه، ولی با دمایی معادل ۸۵ درجه سلسیوس و برای مدت ۵ و ۷ روز جای گذاری گردیدند. در هر حالت نمونه‌های مخلوط تحت آزمایش استقامت مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم در حات خشک و مرطوب مطابق استاندارد AASHTO T283 قرار گرفته اند. در هر حالت ۳ نمونه مشابه مورد آزمایش قرار گرفته و از میانگین آنها در تحلیلها استفاده گردیده است. در مجموع ۷۲ نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. شکل ۳ نمونه‌های ساخته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد.

۳-۲ آزمایشات انجام گرفته

۳-۳-۱ آزمایش مارشال

آزمایش مارشال مطابق استاندارد ASTM-D1559 انجام شد. حداکثر بار تحمل شده تا لحظه شکست نمونه به عنوان

میلی‌متر و با درصد فضای خالی $0.5 \pm 7\%$ ساخته شدند. نمونه‌ها به دو گروه خشک و تر تقسیم‌بندی شدند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش، در کیسه پلاستیکی قرار داده شدند و به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. گروه دیگر از نمونه‌ها ابتدا توسط دستگاه خلأ، بین ۷۰ تا ۸۰ درصد، اشباع شدند، پس از اشباع‌سازی، نمونه‌ها در کیسه پلاستیکی محتوی ۱۰ میلی‌لیتر آب، قرار داده شدند. سپس، در فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۶ ساعت، نگهداری شدند. بعد از آن نمونه‌ها در حمام مارشال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. در مرحله آخر عمل‌آوری و قبل از آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند. نمونه‌های عمل‌آوری شده و نمونه‌های خشک تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک، معرف TSR بوده و مطابق معادله (۲) محاسبه گردید.

$$TSR = 100 \left(\frac{ITS_w}{ITS_d} \right) \quad (2)$$

که در آن، TSR: نسبت مقاومت کششی، ITS_w : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده (kPa)، ITS_d : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک (kPa).

استقامت مارشال و میزان تغییر شکل قطری در لحظه شکست به عنوان نرمی مخلوط اندازه‌گیری گردید. از تقسیم استقامت مارشال به نرمی نسبت مارشال مخلوطها تعیین گردید که نشان دهنده مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل تغییر شکل می‌باشد (Ameri et al., 2013).

۲-۳-۲ آزمایش مقاومت کششی

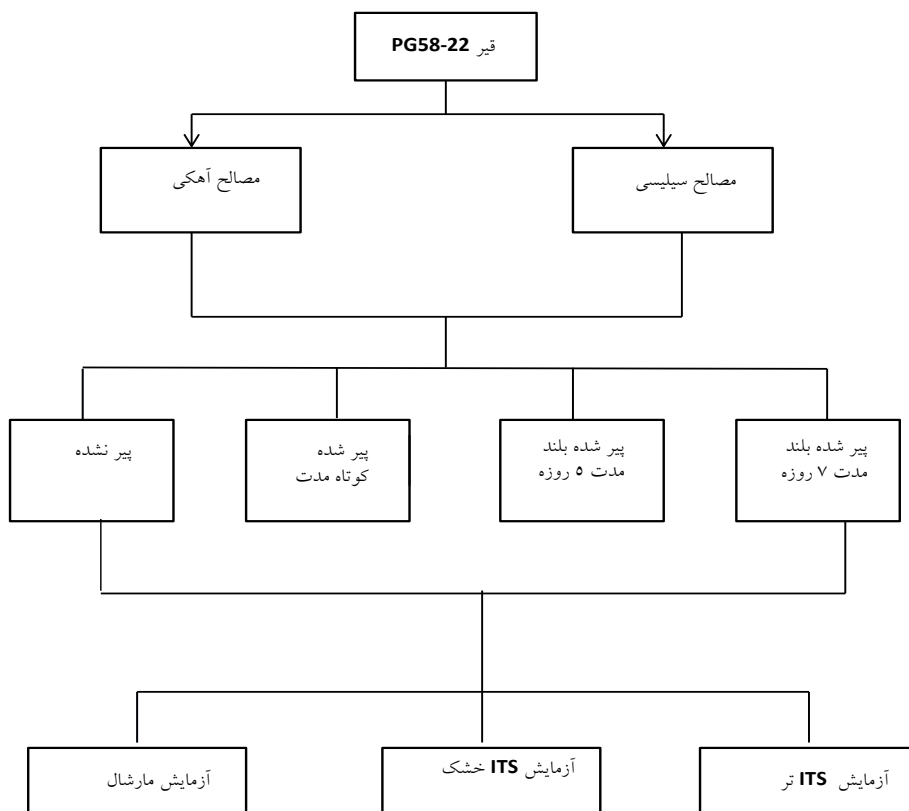
آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی مخلوطها مطابق استاندارد ASTM-D6931 به منظور تعیین مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطها انجام گرفت. در این آزمایش که در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت نمونه‌های استوانه‌ای مارشال در جهت قطر تحت بار با نرخ بارگذاری ثابت قرار گرفته و در زمان شکست نمونه مقدار بار عمودی (P) اندازه‌گیری گردید و از رابطه ۱ مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه گردید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (1)$$

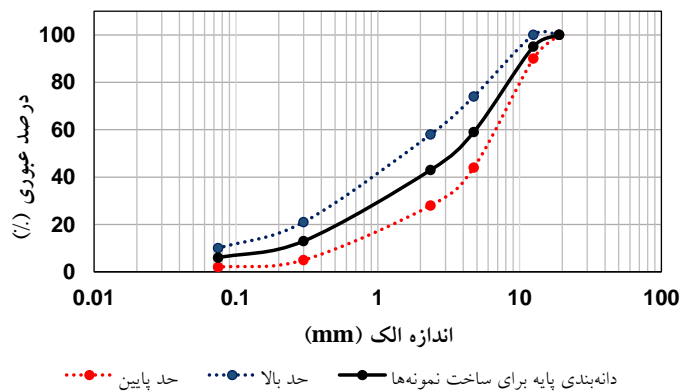
که در آن، ITS، مقاومت کششی غیر مستقیم (کیلو پاسکال)، P حداکثر بار اعمالی (نیوتن)، t ارتفاع نمونه (میلی‌متر) و D قطر نمونه (میلی‌متر) می‌باشد.

در این تحقیق برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوطها، از روش لاتمن اصلاح شده مطابق استاندارد (AASHTO-T283) استفاده گردید. برای انجام آزمایش برای هر نوع مخلوط ۶ نمونه به قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ضخامت تقریبی 1 ± 67

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی



شکل ۱. فلوچارت آزمایش‌های تحقیق



شکل ۲. دانه بندی مخلوطهای مورد استفاده در تحقیق



شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده برای آزمایشات

۲-۴ آزمایشات انجام گرفته

۲-۴-۱ آزمایش مارشال

آزمایش مارشال مطابق استاندارد ASTM-D1559 انجام شد. حداکثر بار تحمل شده تا لحظه شکست نمونه به عنوان استقامت مارشال و میزان تغییر شکل قطری در لحظه شکست به عنوان نرمی مخلوط اندازه گیری گردید. از تقسیم استقامت مارشال به نرمی نسبت مارشال مخلوطها تعیین گردید که نشان دهنده مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل تغییر شکل می باشد (Ameri et al., 2013).

۲-۴-۲ آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی مخلوطها مطابق استاندارد ASTM-D6931 به منظور تعیین مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطها انجام گرفت. در این آزمایش که در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت نمونه‌های استوانه‌ای مارشال در جهت قطر تحت بار با نرخ بارگذاری ثابت قرار گرفته و در زمان شکست نمونه مقدار بار عمودی (P) اندازه گیری گردید (شکل ۴) و از رابطه ۱ مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه گردید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که در آن، ITS، مقاومت کششی غیر مستقیم (کیلو پاسکال)، P حداکثر بار اعمالی (نیوتن)، t ارتفاع نمونه (میلی متر) و D قطر نمونه (میلی متر) می باشد.

در این تحقیق برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوطها، از روش لاتمن اصلاح شده مطابق استاندارد (AASHTO-T283) استفاده گردید. برای انجام آزمایش برای هر نوع مخلوط ۶ نمونه به قطر ۱۰۱ میلی متر و ضخامت تقریبی 1 ± 0.7 میلی متر و با درصد فضای خالی 0.5 ± 0.7 ساخته شدند. نمونه ها به دو گروه خشک و تر تقسیم بندی شدند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش، در کیسه پلاستیکی قرار داده شدند و به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. گروه

دیگر از نمونه‌ها ابتدا توسط دستگاه خلأ، بین ۷۰ تا ۸۰ درصد، اشباع شدند، پس از اشباع سازی، نمونه‌ها در کیسه پلاستیکی محتوی ۱۰ میلی لیتر آب، قرار داده شدند. سپس، در فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد به مدت حداقل ۱۶ ساعت، نگهداری شدند (شکل ۵). بعد از آن نمونه‌ها در حمام مارشال در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. در مرحله آخر عمل آوری و قبل از آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند. نمونه‌های عمل آوری شده و نمونه‌های خشک تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک، معرف TSR بوده و مطابق معادله (۲) محاسبه گردید.

$$TSR = 100 \left(\frac{ITS_w}{ITS_d} \right) \quad (2)$$

که در آن، TSR: نسبت مقاومت کششی، ITS_w : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل آوری شده (kPa)، ITS_d : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک (kPa).



شکل ۴. آزمایش کشش غیر مستقیم



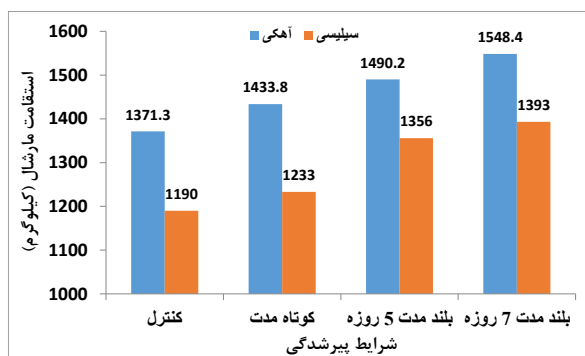
شکل ۵. نمونه‌ها بعد از فریز شدن

۳. نتایج و بحث

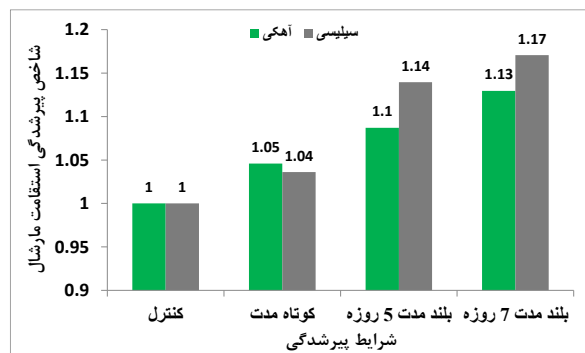
۳-۱ نتایج آزمایش مارشال

نتایج آزمایش مارشال به عنوان شاخص‌هایی که ارتباط مستقیم با عملکرد روسازی دارند در نظر گرفته می‌شوند (White and Magee, 2019). استقامت مارشال یک شاخص شناخته شده برای مقاومت در برابر جابجایی، تنش برشی و شیارشدگی است (Mashaan et al., 2013). شکل ۶ نتایج استقامت مارشال مخلوطها را در شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، استقامت مارشال مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از مصالح سنگی سیلیسی می‌باشد. با توجه به یکسان بودن دانه‌بندی، نوع و مقدار قیر این تفاوت در استقامت به ویژگی‌های مصالح سنگی ارتباط می‌یابد. مصالح آهکی دارای درصد شکستگی بیشتری از مصالح سیلیسی می‌باشد. بافت سطحی سنگدانه‌ها نیز می‌تواند در این تفاوت موثر باشد که در این تحقیق برای سنگدانه‌ها ارزیابی نگردیده است. نتایج همچنین بیانگر این

است که با اعمال پیرشدگی استقامت مارشال افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش سختی قیر با پیرشدگی می‌باشد. برای مثال، با اعمال پیرشدگی بلند مدت ۷ روزه، استقامت مارشال مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی حدوداً ۱۳ درصد و برای مصالح سنگی سیلیسی حدوداً ۱۷٪ نسبت به حالت پیرنشده افزایش می‌یابد. به منظور بررسی تاثیر نوع مصالح سنگی بر روی پیرشدگی، شاخص پیرشدگی با تقسیم میزان استقامت مارشال بعد از اعمال پیرشدگی به استقامت مارشال در حالت کنترل محاسبه گردید که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، شاخص پیرشدگی در حالت پیر شدگی بلند مدت بیش از حالت پیرشدگی کوتاه مدت بوده و مقدار پیرشدگی با افزایش زمان پیرشدگی بلند مدت افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج بیانگر این است که، جنس مصالح سنگی تاثیر مهمی بر روی پیرشدگی کوتاه مدت ندارد، اما، مصالح سنگی سیلیسی باعث پیرشدگی بلند مدت بیشتری در قیر نسبت به مصالح سنگی آهکی می‌شوند.



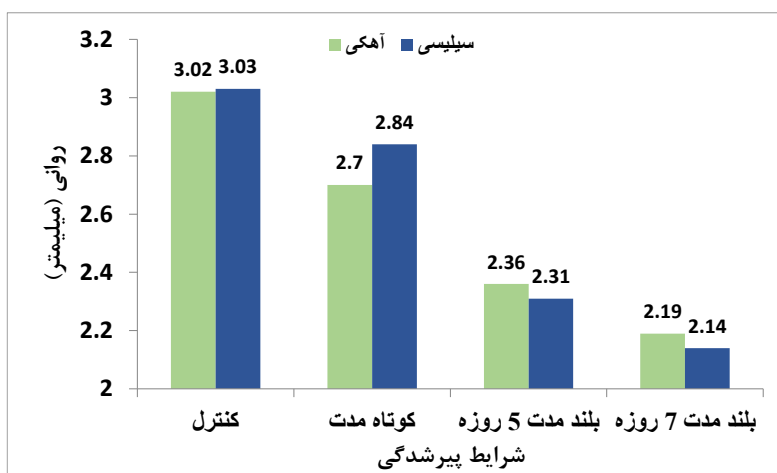
شکل ۶. استقامت مارشال مخلوطهای آسفالتی



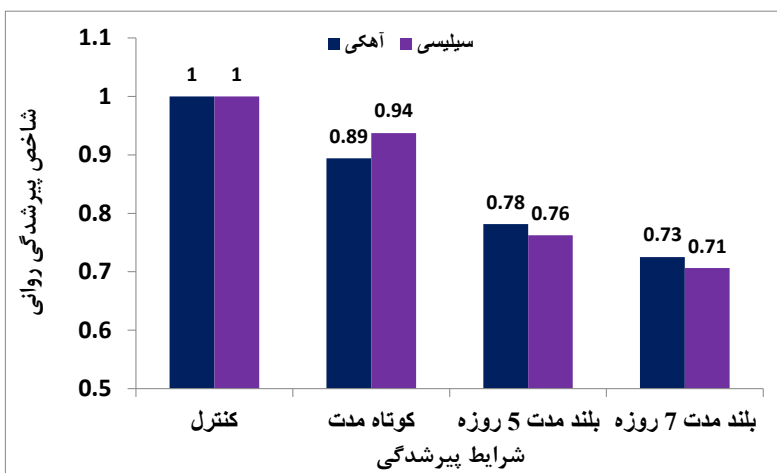
شکل ۷. شاخص پیرشدگی محاسبه شده برای استقامت مارشال

سیلیسی در بلند مدت باشد. با این وجود، همه مخلوطها حداقل و حداکثر روانی مورد نیاز در مشخصات فنی را که به ترتیب ۲ و ۳,۵ میلی متر می‌باشد را تامین می‌نمایند. به منظور بررسی تاثیر جنس مصالح سنگی بر پیرشدگی، شاخص پیرشدگی مخلوطها با تقسیم مقدار روانی بعد از اعمال پیرشدگی به روانی مخلوطها بدون اعمال پیرشدگی محاسبه گردید که نتایج در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مطابق با نتایج شاخص پیرشدگی استقامت مارشال در شکل ۷ مصالح سنگی سیلیسی در کوتاه مدت پیرشدگی کمتری از مصالح آهکی نتیجه داده ولی در بلند مدت پیرشدگی بیشتری در مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی نسبت به مصالح سنگی آهکی رخ می‌دهد.

شکل ۸ مقادیر روانی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی را تحت شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رود، روانی مخلوطها با اعمال پیرشدگی کاهش می‌یابد و این کاهش برای پیرشدگی بلند مدت بیشتر از پیرشدگی کوتاه مدت بوده و افزایش زمان پیرشدگی بلند مدت نیز باعث کاهش بیشتر روانی می‌گردد. در شکل ۸ همچنین ملاحظه می‌گردد که علیرغم بیشتر بودن مقدار روانی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی در حالت پیرنشده و پیرشده کوتاه مدت، در شرایط پیرشدگی بلند مدت مقدار روانی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی کمتر از مصالح آهکی می‌باشد. این موضوع می‌تواند به دلیل رخ دادن پیرشدگی بیشتر قیر در تماس با مصالح سنگی



شکل ۸. روانی مخلوطهای آسفالتی در شرایط مختلف پیرشدگی

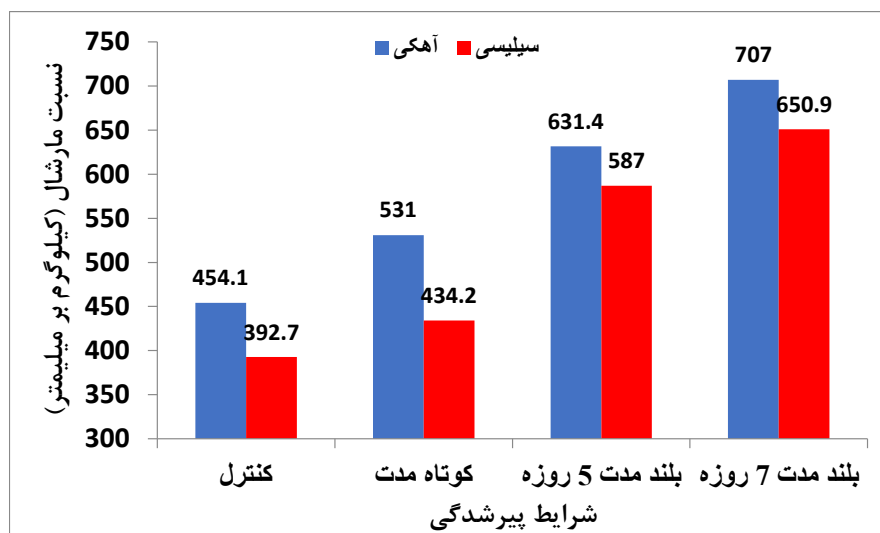


شکل ۹. شاخص پیرشدگی محاسبه شده بر حسب روانی مخلوطها

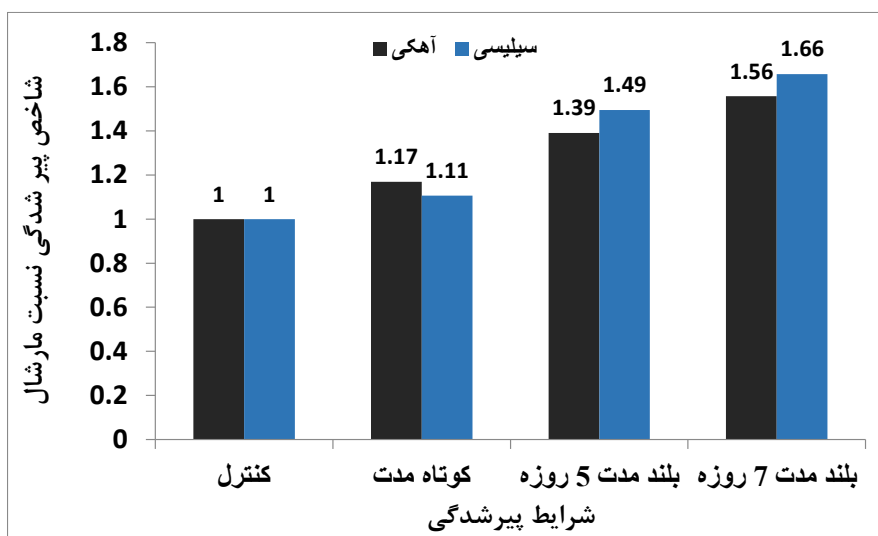
بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بعد از اعمال پیر شدگی بلند مدت ۷ روزه ۵۵٪ نسبت به مخلوط کنترل افزایش داشته و این مقدار برای مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی ۶۵٪ می باشد که نشان دهنده این است که اثرات پیرشدگی بلند مدت در مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی بیشتر از آن در مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی است. با این حال، بعد از اعمال پیرشدگی کوتاه مدت میزان نسبت مارشال در مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی ۱۶٪ نسبت به مخلوط کنترل اضافه شده و این مقدار در مصالح ساخته شده با مصالح سیلیسی ۱۰٪ می باشد که بیانگر این است که اثر پیرشدگی کوتاه مدت در مصالح سنگی سیلیسی کمتر از مصالح آهکی است. به منظور بررسی تاثیر پیر شدگی در انواع مختلف مخلوطها شاخص پیرشدگی با تقسیم نسبت مارشال بعد از پیرشدگی به قبل از پیرشدگی محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده اند. ملاحظه می گردد که در بلند مدت ۵ و ۷ روزه پیرشدگی در مخلوطهای حاوی سنگدانه های سیلیسی بیشتر از آن در مخلوطهای حاوی سنگدانه های آهکی است. اما در کوتاه مدت مصالح آهکی پیرشدگی بیشتری را نسبت به مصالح سیلیسی نتیجه داده اند.

شکل ۱۰ نتایج نسبت مارشال مخلوطهای آسفالتی را در حالات مختلف پیرشدگی نشان می دهد. نسبت مارشال با تقسیم استقامت مارشال به میزان روانی مخلوطها محاسبه گردیده است. در مشخصات فنی مخلوطهای آسفالتی در ایران الزامی بر روی نسبت مارشال وجود ندارد. در استاندارد استرالیا اگر میزان روانی از حد مجاز تا ۱ میلیمتر بیشتر بوده ولی نسبت مارشال از حداقل تعیین شده بیشتر باشد مخلوط آسفالتی دارای مشخصات مناسب خواهد بود (Setiadji, 2005). در برخی از کشورها نیز حداقل مقداری برای نسبت مارشال الزام شده و در برخی از کشورها نیز به منظور کنترل مقاومت به ترک خوردگی علاوه بر حداقل مقدار معیار حداکثری نیز معین گردیده است. مثلا در کشور استرالیا حداقل نسبت مارشال حدود ۱۷۵ کیلوگرم بر میلیمتر و در انگلستان نسبت مارشال بین حداقل ۲۰۰ تا حداکثر ۵۰۰ کیلوگرم بر میلیمتر می باشد (Setiadji, 2005). همانگونه که در شکل ۶ ملاحظه می گردد، مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی دارای نسبت مارشال بزرگتری می باشند که نشان دهنده سختی و مقاومت بیشتر آنها در برابر تغییر شکل می باشد. همچنین، نتایج بیانگر این است که با اعمال پیر شدگی میزان نسبت مارشال افزایش می یابد که به دلیل سخت شونندگی قیر در اثر پیر شدگی می باشد. برای مثال، نسبت مارشال



شکل ۱۰. نتایج نسبت مارشال مخلوطها



شکل ۱۱. شاخص پیرشدگی برای نسبت مارشال

مطالعه زیادی بر روی تاثیر رطوبت و سیکلهای ذوب و یخبندان بر روی مقاومت کششی غیر انجام شده است، تاثیر پیرشدگی بر روی مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوطهای آسفالتی به اندازه کافی انجام نگرفته است (Islam et al., 2015). شکل ۱۲ و ۱۳، به ترتیب، نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی را در شرایط مختلف پیرشدگی در شرایط خشک و مرطوب نشان می‌دهند. لازم به ذکر است این مخلوطها حاوی ۶،۵ تا ۷،۵٪ فضای خالی بوده و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد تحت آزمایش کشش غیر مستقیم قرار گرفته‌اند. مقایسه شکل ۱۲ و ۱۳ نشان دهنده این است که مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از آنهایی است که با مصالح سنگی سیلیسی ساخته شده‌اند. دلیل مقاومت کششی بیشتر در مخلوطهای با مصالح سنگی آهکی به مقاومت چسبندگی بیشتر بین قیر و مصالح سنگی آهکی نسبت به مصالح سیلیسی ارتباط می‌یابد، که ناشی از بیشتر بودن ترکیب شیمیایی اکسید کلسیم (CaO) در مصالح آهکی است. قیر با ترکیب شیمیایی اکسید کلسیم اندرکنش قوی‌تری داشته و چسبندگی بهتری ایجاد می‌کند (Leusueur et al., 2013). همچنین، همانگونه که از شکل

۲-۳ نتایج آزمایش مقاومت کششی و حساسیت

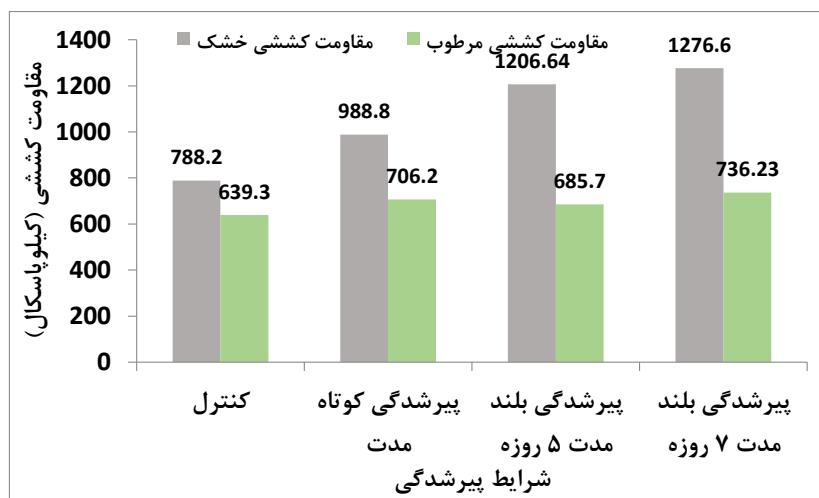
رطوبتی

ترک خوردگی و شیارشدگی دو نوع از خرابی‌های اصلی در روسازی‌های آسفالتی می‌باشند، که تاثیر خصوصیات رویه آسفالتی بر این خرابی‌ها بسیار با اهمیت می‌باشد. برای ارزیابی مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر این خرابی‌ها انواع مختلفی از آزمایشها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین آزمایشها مقاومت کششی غیر مستقیم می‌باشد (Islam et al., 2015). مقاومت کششی غیر مستقیم بالاتر در یک مخلوط نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی و شیارشدگی است (Huang et al., 2004; Christiansen et al., 2000; Islam et al., 2015). در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوطهایی که کرنش بیشتری را تا قبل از شکست تحمل نمایند در برابر خستگی مقاومت بیشتری خواهند داشت (Islam et al., 2015). در راهنمای طراحی تحلیلی-تجربی اشتون نیز مقاومت کششی غیر مستقیم در مدل پیش بینی ترکهای عرضی استفاده می‌گردد. مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط آسفالتی در هنگام سرویس‌دهی در روسازی متاثر از عوامل مختلفی مثل رطوبت، سیکلهای ذوب و یخ و پیرشدگی می‌باشد. اگرچه

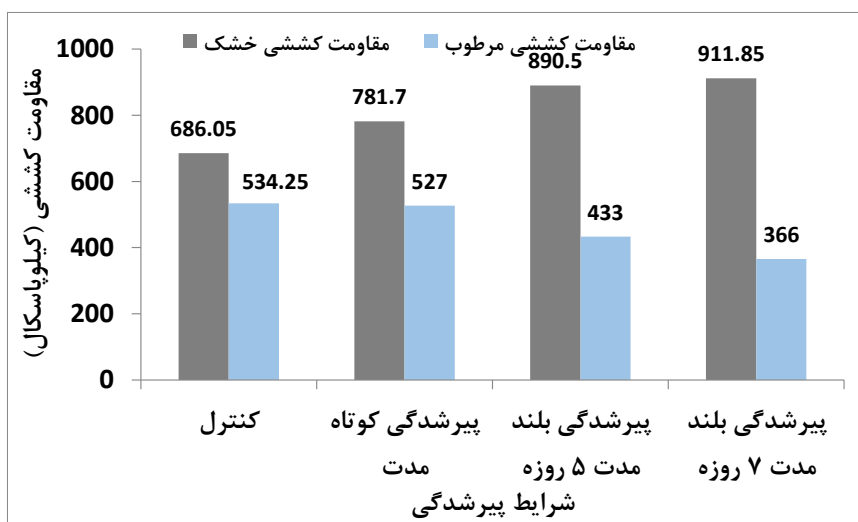
بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

پیرشدگی بلند مدت ۷ روزه ۳۲٪ کاهش می‌یابد. به منظور تعیین میزان تاثیر پیرشدگی به مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی مختلف شاخص پیرشدگی با تقسیم مقاومت کششی در حالات مختلف پیرشدگی به مقاومت کششی مخلوط کنترل محاسبه گردید که نتایج آن برای حالت خشک و مرطوب به ترتیب در شکل ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد شاخص پیرشدگی برای مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از آن برای مصالح سنگی سیلیسی است. همچنین، میزان شاخص پیرشدگی برای هر دو نوع مصالح در حالت خشک بیشتر از حالت مرطوب است. به غیر از مقاومت کششی در حالت مرطوب، برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی، با افزایش میزان پیرشدگی شاخص پیرشدگی افزایش می‌یابد و این افزایش برای مصالح آهکی بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج آزمایش مارشال نشان داد که تاثیر پیرشدگی بر روی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سیلیسی بیشتر از مصالح آهکی است، اما، در نتایج مقاومت کششی عکس این موضوع مشاهده گردید. این تناقض به تفاوت در دمای انجام آزمایش مارشال و مقاومت کششی که به ترتیب ۶۰ و ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشند، و تفاوت در فضای خالی نمونه‌ها در دو آزمایش ارتباط می‌یابد.

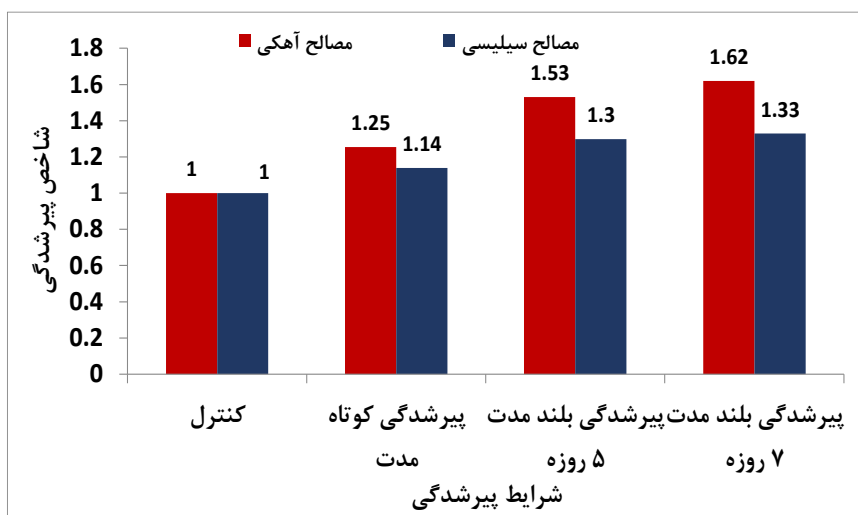
۱۲ مشخص است پیرشدگی باعث افزایش مقاومت کششی مخلوطهای ساخته شده با مصالح آهکی در شرایط خشک و مرطوب می‌گردد و این افزایش در پیرشدگی بلند مدت بیشتر از کوتاه مدت بوده و با افزایش زمان پیرشدگی بلند مدت نیز افزایش می‌یابد. دلیل افزایش مقاومت کششی با پیرشدگی بهبود چسبندگی قیر با مصالح سنگی در اثر افزایش تمرکز مولکولهای قطبی در قیر در اثر پیرشدگی است (Bagampadde, 2004). تحقیقات قبلی نیز نشان داده‌اند افزایش سختی قیر باعث افزایش چسبندگی بین و مصالح سنگی می‌گردد (Abo- Qudais and Mulqi, 2005). اما، برای مخلوطهای ساخته شده با مصالح سیلیسی مقاومت کششی در حالت خشک با افزایش پیرشدگی افزایش یافته اما در حالت مرطوب پیرشدگی باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد. برای مثال، افزایش مقاومت کششی در حالت خشک بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت ۷ روزه نسبت به حالت پیرنشده برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگ آهکی ۶۲٪ و برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی ۳۲٪ می‌باشد. اما، مقاومت کششی در حالت مرطوب بعد از پیرشدگی بلند مدت ۷ روزه برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی ۱۵٫۲٪ نسبت به حالت پیرنشده افزایش می‌یابد، در حالی که برای مصالح سنگی سیلیسی مقاومت کششی در حالت مرطوب بعد از اعمال



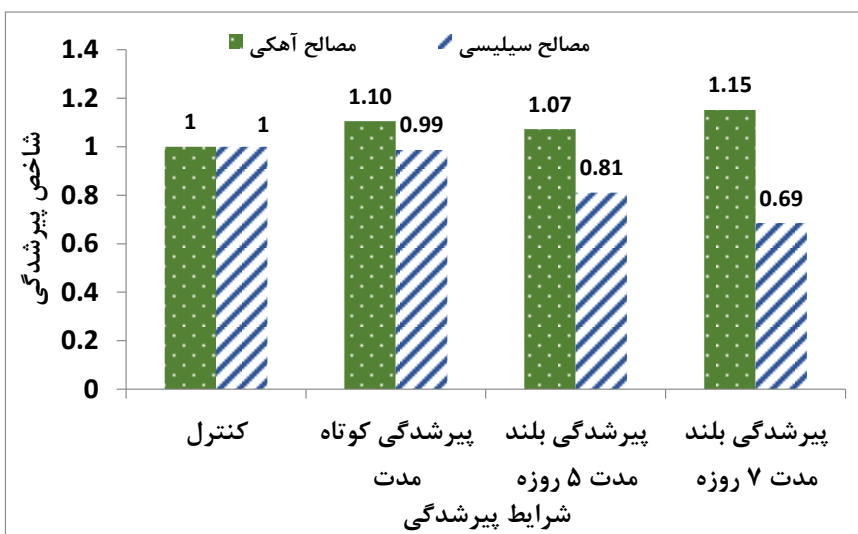
شکل ۱۲. مقاومت کششی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی



شکل ۱۳. مقاومت کششی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی



شکل ۱۴. شاخص پیرشدگی برای مقاومت کششی در حالت خشک

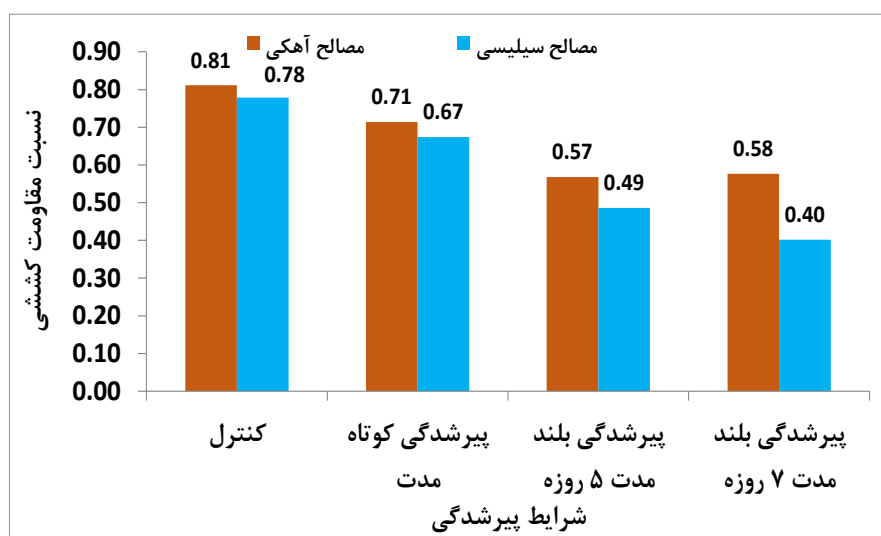


شکل ۱۵. شاخص پیرشدگی برای مقاومت کششی در حالت خشک

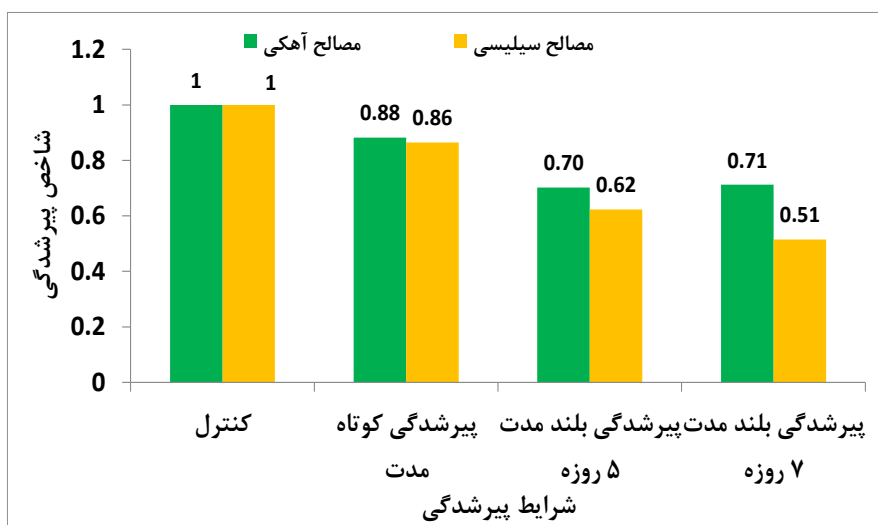
بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

شده که نتایج آن در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در تمامی حالتها نسبت مقاومت کششی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی کمتر آن برای مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی است. این یک موضوع پذیرفته شده می‌باشد که سنگدانه‌های سیلیسی آب-دوست بوده و تمایل به تشکیل پیوند با مولکولهای آب دارند که باعث جابجایی مولکولهای قیر می‌شوند، و مصالح سنگی آهکی آب‌گریز می‌باشند و تمایل بیشتری به تشکیل پیوند با مولکولهای قیر دارند (Hicks, 1991). همچنین، نتایج نشان می‌دهد که پیرشدگی باعث کاهش نسبت مقاومت کششی و افزایش حساسیت رطوبتی مخلوطها می‌گردد، اما میزان تاثیر آن بر مصالح سنگی سیلیسی بیشتر است. شاخص پیرشدگی با تقسیم نسبت مقاومت کششی بعد از اعمال پیرشدگی در مخلوطها به نسبت مقاومت کششی در مخلوطهای پیرنشده محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۱۷ داده شده‌اند. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، پیرشدگی باعث می‌گردد حساسیت رطوبتی مخلوطها افزایش یابد و این افزایش با بیشتر شدن زمان پیرشدگی افزایش می‌یابد، و تاثیر آن در مخلوطهای ساخته شده با مصالح سیلیسی بیشتر از آهکی است.

موضوع دیگری که از مقایسه شکل ۱۲ و ۱۳ قابل استنتاج است این است که مقاومت کششی در حالت مرطوب از حالت خشک کمتر است که به دلیل آسیب رطوبت به چسبندگی قیر و سنگدانه و پیوستگی قیر می‌باشد. مقدار کاهش در مقاومت کششی برای مصالح سنگی سیلیسی بیشتر از آن برای مصالح سنگی آهکی است که به دلیل آبدوستی بیشتر مصالح سنگی سیلیسی به دلیل ترکیبات کانی شناسی آن می‌باشد. برای مثال، در حالت کنترل که مخلوطها تحت پیرشدگی قرار نگرفته‌اند مقاومت کششی در حالت مرطوب نسبت به حالت خشک برای مخلوط حاوی مصالح سنگی آهکی حدود ۱۹٪ و برای مصالح سیلیسی حدود ۲۲٪ کاهش یافته است. اما، مقدار کاهش با اعمال پیرشدگی در مصالح سیلیسی بیشتر از آهکی بوده است. برای مثال در حالت پیرشده بلند مدت ۷ روزه مقدار کاهش برای مخلوط ساخته شده با مصالح سیلیسی حدود ۶۱٪ و برای مصالح آهکی حدود ۴۲٪ است. این نتیجه بر خلاف انتظاری است که با پیرشدگی و افزایش ویسکوزیته قیر باید پیوند بین قیر و سنگدانه‌ها افزایش یابد، که محققان قبلی نیز این موضوع را تایید نموده بودند (Pasandin and Perez, 2014). به منظور تعیین حساسیت رطوبتی در حالات مختلف نسبت مقاومت کششی در حالت مرطوب به حالت خشک محاسبه



شکل ۱۶. نسبت مقاومت کششی مخلوطها



شکل ۱۷. شاخص پیرشدگی برای نسبت مقاومت کششی

۴. تحلیل آماری نتایج

گفته شده بر روی خواص مورد نظر دارای اهمیت می‌باشد. جداول ۷ تا ۱۲ نتایج تحلیل واریانس را، به ترتیب، برای خواص استقامت مارشال، روانی، نسبت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم خشک، مقاومت کششی غیر مستقیم مرطوب و نسبت مقاومت کششی (TSR) نشان می‌دهند. همانگونه که در جداول ۷ تا ۱۲ ملاحظه می‌گردد، جنس سنگدانه، شرایط پیرشدگی و اثر اندرکنشی آنها بر روی خواص مورد مطالعه با اهمیت هستند. برای مثال، در یک مخلوط آسفالتی با همه ویژگی‌های یکسان اما سنگدانه‌های متفاوت استقامت مارشال متفاوت خواهد بود. همچنین، استقامت مارشال با اعمال شرایط مختلف پیرشدگی تغییر کرده و میزان این تغییر به جنس سنگدانه بستگی دارد.

تحلیل آماری با استفاده از تحلیل واریانس دو طرفه با جایگزینی در نرم افزار اکسل انجام گرفت تا اهمیت تاثیر نوع مصالح سنگی، شرایط پیرشدگی و اندرکنش آنها بر روی خصوصیات مختلف مخلوطها بررسی گردد. سطح اطمینان ۹۵٪ برای تحلیل انتخاب گردید. دو نوع مصالح سنگی شامل آهکی و سیلیسی و ۴ حالت پیرشدگی شامل پیرنشده، پیرشده کوتاه مدت، پیرشده بلند مدت ۵ روزه و ۷ روزه مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، درجه آزادی (DF) برای نوع سنگدانه ۱ و برای شرایط پیرشدگی ۳ می‌باشد. برای تعیین این که آیا نوع سنگدانه، شرایط پیرشدگی و اندرکنش آنها اثر مهمی بر خصوصیات مخلوطها دارد از p-value استفاده می‌گردد. مقادیر کمتر از ۰,۰۵ برای p-value نشان می‌دهد که اثر موارد

جدول ۷. نتایج تحلیل واریانس برای استقامت مارشال

| منبع | DF | F | F _{cr} | p-value | اهمیت |
|-------------------------------------|----|---------|-----------------|----------|-------|
| نوع سنگدانه | ۱ | ۵۵۴,۰۱ | ۴,۴۹۳ | 7.66E-4 | دارد |
| شرایط پیرشدگی | ۳ | ۱۵۲۳۸,۷ | ۳,۲۳۸ | 7.49E-28 | دارد |
| اندرکنش نوع سنگدانه و شرایط پیرشدگی | ۳ | ۶۹,۴۴ | ۳,۲۳۸ | 2.16E-9 | دارد |

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس برای روانی مارشال

| منبع | DF | F | F _{cr} | p-value | اهمیت |
|-------------------------------------|----|-------|-----------------|----------|-------|
| نوع سنگدانه | ۱ | ۴,۵۷ | ۴,۴۹۳ | ۰,۰۴۸۳ | دارد |
| شرایط پیرشدگی | ۳ | ۴۸,۹۴ | ۳,۲۳۸ | ۲,۷۷E-8 | دارد |
| اندرکنش نوع سنگدانه و شرایط پیرشدگی | ۳ | ۱۰,۴ | ۳,۲۳۸ | ۰,۰۰۰۴۸۴ | دارد |

جدول ۹. نتایج تحلیل واریانس برای نسبت مارشال

| منبع | DF | F | F _{cr} | p-value | اهمیت |
|-------------------------------------|----|---------|-----------------|----------|-------|
| نوع سنگدانه | ۱ | ۳۶۳,۸۴ | ۴,۴۹۳ | 1.98E-12 | دارد |
| شرایط پیرشدگی | ۳ | ۸۳۱۲,۲۲ | ۳,۲۳۸ | ۹,۵۴E-26 | دارد |
| اندرکنش نوع سنگدانه و شرایط پیرشدگی | ۳ | ۷۰,۲۲ | ۳,۲۳۸ | ۱,۹۹E-9 | دارد |

جدول ۱۰. نتایج تحلیل واریانس برای مقاومت کششی در حالت خشک

| منبع | DF | F | F _{cr} | p-value | اهمیت |
|-------------------------------------|----|---------|-----------------|----------|-------|
| نوع سنگدانه | ۱ | ۴۳۲,۶۶ | ۴,۴۹۳ | ۶,۶۸E-21 | دارد |
| شرایط پیرشدگی | ۳ | ۳۸۱۳۴,۷ | ۳,۲۳۸ | ۴,۸۸E-31 | دارد |
| اندرکنش نوع سنگدانه و شرایط پیرشدگی | ۳ | ۸۲۱,۳۴۵ | ۳,۲۳۸ | ۹,۹۹E-18 | دارد |

جدول ۱۱. نتایج تحلیل واریانس برای مقاومت کششی در حالت مرطوب

| منبع | DF | F | F _{cr} | p-value | اهمیت |
|-------------------------------------|----|----------|-----------------|----------|-------|
| نوع سنگدانه | ۱ | ۲۴۱۰,۶ | ۴,۴۹۳ | ۷,۰۴E-19 | دارد |
| شرایط پیرشدگی | ۳ | ۱۱۷۱۵,۲۴ | ۳,۲۳۸ | ۶,۱۴E-27 | دارد |
| اندرکنش نوع سنگدانه و شرایط پیرشدگی | ۳ | ۴۰۰,۳۲۲ | ۳,۲۳۸ | ۲,۹۶E-15 | دارد |

جدول ۱۲. نتایج تحلیل واریانس برای نسبت مقاومت کششی

| منبع | DF | F | F _{cr} | p-value | اهمیت |
|-------------------------------------|----|---------|-----------------|----------|-------|
| نوع سنگدانه | ۱ | ۵۲۸ | ۴,۴۹۳ | ۱,۱۱E-13 | دارد |
| شرایط پیرشدگی | ۳ | ۱۹۴۴,۵۵ | ۳,۲۳۸ | ۱,۰۴E-20 | دارد |
| اندرکنش نوع سنگدانه و شرایط پیرشدگی | ۳ | ۷۳۰,۴۷ | ۳,۲۳۸ | ۲,۵۴E-17 | دارد |

۵. نتیجه گیری

مختلف پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت تحت آزمایشهای مارشال و مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب قرار گرفته و تاثیر پیرشدگی بر این ویژگیها در مخلوطهای مختلف بررسی گردید. نتایج مهم زیر از این مطالعه استخراج می‌گردد.

در این تحقیق، تاثیر جنس مصالح سنگی در پیرشدگی مخلوطهای آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است. مخلوطهای بتن آسفالتی با مقدار قیر یکسان با استفاده از دو نوع مصالح سنگی سیلیسی و آهکی ساخته شده و بعد از اعمال شرایط

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره دوم (۵۹) / زمستان ۱۴۰۲

بیشتر از آن در مخلوطهای ساخته شده با مصالح آهکی است.

• افزایش زمان پیرشدگی بلند مدت تغییری در حساسیت رطوبتی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی نداشته اما در مخلوطهای حاوی مصالح سنگی سیلیسی افزایش زمان پیرشدگی حساسیت رطوبتی را افزایش داده است.

• تحلیل واریانس نتایج نشان داد که جنس مصالح مصالح سنگی و شرایط پیرشدگی و اندر کنش آنها بر روی خصوصیات مورد مطالعه اثر مهمی دارند.

• از نظر کاربردی، نتایج این تحقیق در انتخاب نوع سنگدانه‌ها می‌تواند مورد توجه مهندسان قرار گیرد. در مناطقی که بارندگی بیشتر و بوده و یا شرایط محیطی امکان پیرشدگی بیشتری را برای قیر فراهم می‌کند استفاده از مصالح سنگی آهکی توصیه می‌شود زیرا در صورت استفاده از مصالح سیلیسی پیرشدگی به شدت مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر ترک خوردگی و آسیب رطوبتی تضعیف می‌کند.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Unbound Aggregates
2. Short-term ageing
3. Long-term ageing
4. Rolling film oven test (RTFOT)
5. Thin film oven test (TFOT)
6. Pressure ageing vessel (PAV)

۷. مراجع

- آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰. نشریه شماره ۲۳۴. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.

- طاهرخانی، ح، بیات، ح، نوریان، ف. (۱۴۰۰) "بررسی ویژگی‌های حجمی، استقامتی و خزشی بتن آسفالتی حاوی

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال پانزدهم/ شماره دوم (۵۹)/ زمستان ۱۴۰۲

• مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی استقامت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت کششی بیشتر و روانی کمتری از مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی دارند، که این تفاوت به بافت سطحی و شکستگی سنگدانه‌ها ارتباط می‌یابد.

• مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی حساسیت رطوبتی کمتری از مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی دارند.

• اعمال پیرشدگی باعث افزایش استقامت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت کششی در حالت خشک شده و میزان روانی مارشال مخلوطها را کاهش می‌دهد. میزان تغییر در این مشخصات با افزایش زمان پیرشدگی بیشتر می‌شود.

• به طور کلی، تاثیر پیرشدگی بر خصوصیات مارشال شامل استقامت مارشال، روانی و نسبت مارشال در مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی بیشتر از آن در مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی است. تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت بر این خصوصیات در مخلوطهای حاوی مصالح سیلیسی کمتر از آن در مخلوطهای حاوی مصالح آهکی است.

• مقاومت کششی در حالت خشک در مخلوطهای ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از مصالح سنگی سیلیسی از پیرشدگی تاثیر می‌گیرد.

• در حالی که پیرشدگی باعث افزایش مقاومت کششی خشک و مرطوب در مخلوطهای حاوی مصالح سنگی آهکی می‌شود، در مخلوطهای حاوی مصالح سنگی سیلیسی پیرشدگی باعث میشود مقاومت کششی در حالت مرطوب کاهش یابد.

• پیرشدگی باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با هر دو نوع مصالح سنگی می‌گردد و این تاثیر بر روی مخلوطهای ساخته شده با مصالح سیلیسی

- Barbieri, D. M., Hoff, I., Mørk, M. B. E. (2019) "Innovative stabilization techniques for weak crushed rocks used in road unbound layers: A laboratory investigation" *Transport. Geotech.*, 18 (2019), pp. 132-141.
- Bell, C. A., Wieder, A. J. and Fellin, M. J. (1994) "Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: field validation," Research Report SHRP-A-390, Oregon State University, Corvallis, OR, USA, 1994.
- Bessa, I. S., Branco, V. T., Soares, J. B., Neto, J. A. N. (2015) "Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt, *Journal of. Materials in Civil Engineering*. (2015), [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001181](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001181).
- Brown, S. F. and Scholz, T. V. (2000) "Development of laboratory protocols for the aging of asphalt mixtures," in *Proceedings of 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, vol. 1, pp. 83-90, Barcelona, Spain, September 2000.
- Chang, X., Zhang, R., Xiao, Y., Chen, X., Zhang, X., Liu, G. (2020) "Mapping of publications on asphalt pavement and bitumen materials: a bibliometric review", *Construction and Building Materials* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117370>.
- Chen, G.M. and Tan, Y.Q., (2007) "Asphalt mixture performance research based on coarse aggregate surface texture" *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 24 (2), pp. 8-12.
- Christensen, W. D., Bonaquist, R., and Jack, D. P. (2000) "Evaluation of triaxial strength as a simple test for asphalt
- آسفالت بازیافتی و روغن موتور ضایعاتی" فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۲، شماره ۳، ص. ۵۸۵-۵۶۱.
- Abo-Qudais, S. and Mulqi, M.W. (2005) "New Chemical Antistripping Additives for Bituminous Mixtures". *Journal of ASTM International* 2(8), pp. 87-97.
- Alwardany, M. D., Rad, F. Y., Castorena, C. and Kim, Y. R. (2017) "Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, no. 1, pp. 28-61, 2017.
- 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.
- Azimi Alamdary, Y., Singh, S., & Baaj, H. (2019) "Laboratory simulation of the impact of solar radiation and moisture on long-term age conditioning of asphalt mixes" *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), pp. 1-12. doi:10.1080/14680629.2019.1587496
- Azimi Alamdary, Y., Singh, S., & Baaj, H. (2021) "Effect of aggregates containing iron sulphide on asphalt ageing" *Road Materials and Pavement Design*, 22(3), pp. 623-638.
- Bagampadde, U. (2004). On investigation of stripping propensity of bituminous mixtures (Doctoral dissertation, Bygghvetenskap).
- Baghaee Moghaddam, T., & Baaj, H. (2016) "The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review" *Construction and Building Materials*, 114, pp. 805-816. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015.

- Hashimoto, M., et al., (2011) "Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential" Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2208, pp. 33–39.
- Heitzman, M. (2007) "New Film Thickness Models for Iowa Hot Mix Asphalt", Proc. 2007Mid-Continent Transp. Res. Symp. (2007) 14.
- Hesp, S. A. M., & Shurvell, H. F. (2010) "X-ray fluorescence detection of waste engine oil residue in asphalt and its effect on cracking in service" International Journal of Pavement Engineering, 11(6), pp. 541–553. doi:10.1080/10298436.2010.488729.
- Hicks, R. G. (1991). "Moisture damage in asphalt concrete" (No. 175). Transportation Research Board.
- Houston, W. N., Mirza, M. W., Zapata, C. E. and Raghavendra, S. (2018) "Environmental effects in pavement mix and structural design systems," Part 1 of Contractor's Final Report for NCHRP Project 9-23, Arizona State University, Phoenix, AZ, USA, 2005.
- Huang, B., Kingery, W. R. and Zhang, Z. (2004) "Laboratory study of fatigue characteristics of HMA mixtures containing RAP", in International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, 2004, Auburn, Alabama, USA.
- Islam, M. R., Hossain, M. I., & Tarefder, R. A. (2015). "A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test" Construction and Building Materials, 95, 218-223.
- Kim, Y.R., Little, D.N. and Song, I., (2003) "Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material concrete rut resistance." Final Rep., Pennsylvania Dept. of Transportation.
- Christopher, W. J., Crawford, F. J., Edward, T. H., Adock, M., Delaney, E. P. Freer, H., (2011) "A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary" NCHRP Report No. 673, 2011.
- Craus, J., Ishai, I. and Sides, A., (1978) "Some physico-chemical aspects of the effect and the role of the filler in bituminous paving mixtures" Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 47, pp. 558–588.
- Curtis, G.W., (1993) "Investigation of asphalt-aggregate interactions in asphalt pavements" Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 204 (34), pp. 1292–1298.
- Ensley, E.K., (1973) "A study of asphalt aggregate interactions and asphalt molecular interactions by microcalorimetric methods: postulated interaction mechanism" Journal of the Institute of Petroleum, 59, pp. 279–289.
- Ensley, E.K. and Seholz, H.A., (1972) "A study of asphalt-aggregate interactions by heat of immersion" Journal of the Institute of Petroleum, 58, pp. 95–101.
- Gao, J., Wang, H., Bu, Y., You, Z., Hasan, M.R.M., Irfan, M., (2018) "Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture", Constr. Build. Mater. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170>.
- فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره دوم (۵۹) / زمستان ۱۴۰۲

- Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2014). "Effects of the asphalt penetration grade and the mineralogical composition on the asphalt-aggregate bond" *Petroleum science and technology*, 32(22), 2730-2737.
- Petersen, J. C. (2009) "A review of the fundamentals of asphalt oxidation: Chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships" Washington, DC, USA: Transportation Research Board. ISSN 0097-8515.
- Pouranian, M.R., Haddock, J.E., (2019) "A new framework for understanding aggregate structure in asphalt mixtures", *International Journal of Pavement Engineering* (2019), <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1660340>.
- Reed, J. (2010) "Evaluation of the Effects of Aging on Asphalt Rubber Pavements", Ph.D. Dissertation, Arizona State University, Tempe, AZ, USA, 2010.
- Saghafi, M., Tabatabaee, N., Nazarian, S. (2019) "Performance evaluation of slurry seals containing reclaimed asphalt pavement" (No. 19-02071), (2019).
- Setiadji, B.H. 2005. Use of Waste Materials for Pavement Construction in Indonesia. *Journal of Institution of Engineers*. Singapore. Volume.45, Issue 2.
- Sirin, O., Paul, D. K., & Kassem, E. (2018). "State of the art study on aging of asphalt mixtures and use of antioxidant additives" *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Tao, G., Xiao, Y., Yang, L., Cui, P., Kong, D. Z., Xue, Y. (2019) "Characteristics of steel slag filler and its influence on rheological properties of asphalt mortar", *Construction and Building Materials* (2019), characteristics: mechanistic evaluation". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832, pp. 1-8.
- Lesueur, D. and Little, D.N., (1998) "Effect of hydrated lime on rheology, fracture, and aging of bitumen" *Transportation Research Record*, 1661, pp. 93-105.
- Li, P., Yi, K., Yu, H., Xiong, J., & Xu, R. (2021) "Effect of aggregate properties on long-term skid resistance of asphalt mixture" *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020413.
- Liu, Y. and You, Z., (2011) "Discrete-element modeling: impacts of aggregate sphericity, orientation, and angularity on creep stiffness of idealized asphalt mixtures" *Journal of Materials in Civil Engineering*, 137, pp. 294-303.
- López-Montero, T., & Miró, R. (2016). "Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to ageing and moisture damage" *Construction and Building Materials*, 112, pp. 299-306.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Koting, S., & Karim, M. R. (2013). Performance evaluation of crumb rubber modified stone mastic asphalt pavement in Malaysia. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.
- Mouton, Yves. (2006) "Organic materials in civil engineering" UK: ISTE. doi: 10.1002/9780470612316.
- Von Quintus, H., Scherocman, J., Kennedy, T. and Hughes, C. S. (1988) "Asphalt aggregate mixture analysis system," Final Report to NCHRP 09-06(1), National Research Council, Washington, DC, USA, 1988.

Southeast University (Natural Science Edition), 34 (4), pp. 485–489.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.174>.

-Yan, X.L. and Liang, C.Y., (2001) “Study of the shear adhesiveness between bitumen and rock” China Journal of Highway and Transport, 14 (4), pp. 25–27.

-Wang, F., Xiao, Y., Cui, P., Ma, T., Kuang, D. (2020) “Effect of aggregate morphologies and compaction methods on the skeleton structures in asphalt mixtures”, Construction and Building Materials (2020), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120220>.

-You, Z. and Dai, Q., 2007a. Review of advances in micromechanical modeling of aggregate–aggregate interactions in asphalt mixtures. Canadian Journal of Civil Engineering, 34 (2), pp. 239–252.

-White, G., & Magee, C. (2019). “Laboratory evaluation of asphalt containing recycled plastic as a bitumen extender and modifier”. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 7(5), pp. 218-235.

-You, Z. and Dai, Q., (2007b) “Dynamic complex modulus predictions of hot-mix asphalt using a micromechanical-based finite element model” Canadian Journal of Civil Engineering, 34 (12), pp. 1519–1528.

-Xiao, Q.C., Qian, C.X. and Xie, J.G., (2004) “Experimental research on modification of asphalt concrete performance and asphalt-aggregate interface by coupling agent” Journal of

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

سید امیر حسین بهشتی در سال ۱۳۷۳ در رشته مهندسی عمران از دانشگاه کاشان فارغ التحصیل گردید. در سال ۱۳۷۶ موفق به اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی عمران با گرایش راه و ترابری از دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب گردید و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی راه و ترابری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران است. ضمناً عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان با مرتبه مربی بوده و زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی و مواد و مصالح روسازی است.



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



علیرضا سرکار درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشدرا در رشته مهندسی راه و ترابری در سال ۱۳۸۵ را از دانشگاه علم و صنعت تهران. اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ نیز موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت تهران گردید. در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران می باشند.



پرهام حیاتی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشدرا در رشته مهندسی راه و ترابری در سال ۱۳۸۵ را از دانشگاه علم و صنعت تهران. اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ نیز موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت تهران گردید. در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران می باشند.