

بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر مقاومت به شن زدگی و ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی

مقاله علمی - پژوهشی

سید امیرحسین بهشتی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

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

علیرضا سرکار، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پرهام حیاتی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۲۴-۱

چکیده

در این پژوهش تاثیر شرایط مختلف پیرشدگی بر مقاومت به شن زدگی و مقاومت به ترک خوردگی مخلوط آسفالتی ساخته شده با دو نوع مصالح سنگی مختلف شامل مصالح سنگی آهکی و سیلیسی مطالعه گردیده 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 آزمایش افت وزنی کانتابرو و خمش نیمدایره ای در دمای محیط بر روی آنها انجام شده و نتایج با یکدیگر و حالت کنترل بدون اعمال پیرشدگی مقایسه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی مقاومت به شن زدگی و مقاومت به ترک خوردگی بیشتری از مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی دارد. این نتایج ناشی از بافت زبرتر سنگدانه‌های آهکی نسبت به سیلیسی و داشتن ترکیبات شیمیایی اکسید منیزیم و اکسید کلسیم بیشتر آنها می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که پیرشدگی باعث کاهش مقاومت به شن زدگی، انرژی شکست، چقرمگی شکست، شکل پذیری و بار بحرانی قابل تحمل تا شکست در آزمایش خمش نیمدایره‌ای می‌گردد. میزان تاثیر پیرشدگی بر این ویژگی‌ها به جنس سنگدانه‌ها و نوع خصوصیت عملکردی بستگی دارد. از نظر مقاومت به شن زدگی پیرشدگی تاثیر بیشتری بر روی مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی دارد، ولی خصوصیات شکست شامل انرژی شکست، بار بحرانی و چقرمگی شکست در مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی تاثیر بیشتری از پیرشدگی می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: بتن آسفالتی، پیرشدگی، مصالح سنگی آهکی، مصالح سنگی سیلیسی، شن زدگی، خمش نیمدایره‌ای

۱-مقدمه

خستگی، شن زدگی و آسیب رطوبتی از جمله خرابی‌های رایج در بتن آسفالتی مورد استفاده در رویه روسازی‌ها می‌باشند. مهندسين و محققين حوزه روسازی در پی درک مکانیزم بروز انواع خرابی‌ها در مخلوط‌های آسفالتی و یافتن روشهایی برای افزایش مقاومت در برابر این خرابی‌ها می‌باشند. پیشرفت‌های

بتن آسفالتی یکی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین نوع مخلوط آسفالتی مورد استفاده در ساخت روسازی انعطاف‌پذیر می‌باشد. بتن آسفالتی متراکم در روسازی تحت بار ترافیک و عوامل محیطی در معرض انواع مختلف خرابی‌ها قرار می‌گیرد. خرابی‌هایی از قبیل شیارشدگی، ترک خوردگی حرارتی و

در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به انرژئ شکست^۳، چقرمگی شکست^۴، نرخ کرنش انرژئ بحرانی^۵، شاخص انعطاف پذیری^۶ و شاخص مقاومت به ترک خوردگی^۷ اشاره نمود. این ویژگی‌ها با آزمایش‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شوند. یکی از رایج‌ترین آزمایش‌ها برای ارزیابی خصوصیات شکست مخلوط‌های آسفالتی آزمایش خمش نیم دایره‌ای^۸ (SCB) می‌باشد. آزمایش SCB اولین بار برای مطالعه خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها استفاده گردید (Wang et al., 2016). در سال‌های اخیر به دلیل سادگی و نتایج قابل قبول و مرتبط با عملکرد واقعی از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای برای ارزیابی مقاومت به ترک خوردگی و تعیین خصوصیات شکست مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود (Cao et al., 2018; Hofman et al., 2003; Aliha et al., 2015a; Wang et al., 2016; Safazadeh et al., 2022).

عملکرد مخلوط‌های آسفالتی به مقدار زیادی متأثر از خواص رئولوژیکی قیر است. خصوصیات رئولوژیکی قیر با تغییر در ترکیبات شیمیایی قیر با زمان، که به پیرشدگی موسوم است، تغییر می‌کند (Sirin et al., 2018; Abouelsaad and White, 2022). پیرشدگی قیر که بیشتر ناشی از اکسیداسیون می‌باشد، باعث افزایش سختی قیر شده و آن را مستعد ترک خوردگی می‌کند (Kavussi and Jalili Qazizadeh, 2014). پیرشدگی قیر در دو مرحله رخ می‌دهد که شامل پیرشدگی کوتاه مدت^۹ و بلند مدت^{۱۰} می‌باشد. پیرشدگی کوتاه مدت در حین ذخیره‌سازی در دماهای بالا، اختلاط با مصالح سنگی و پخش و تراکم در دماهای بالا رخ می‌دهد. پیرشدگی بلند مدت وقتی رخ می‌دهد که مخلوط آسفالتی متراکم در روسازی در معرض محیط قرار می‌گیرد. معمولاً، پیرشدگی کوتاه مدت باعث افزایش سریع و قابل توجه در ویسکوزیته قیر می‌شود، و بعد از آن در حین پیرشدگی بلند مدت ویسکوزیته به طور خطی و با نرخ کمتری افزایش می‌یابد. عوامل مختلفی بر روی نرخ پیرشدگی و مقدار آن تأثیر می‌گذارند. از جمله مهمترین عوامل موثر بر پیرشدگی قیر دمای آن در حین ذخیره سازی و تولید و پخش و تراکم، ضخامت لایه قیر بر روی سنگدانه‌ها، فضای خالی مخلوط متراکم، شرایط محیطی از قبیل دمای هوا، رطوبت و اشعه ماوراء بنفش خورشید، و خصوصیات مصالح سنگی از قبیل دانه بندی، جذب آب، خصوصیات

زیادی نیز در این زمینه‌ها انجام گرفته ولی با توجه به تعدد پارامترهای موثر در خرابی و همچنین انواع متعدد خرابی‌ها اثرات متقابل برخی از این فاکتورها بر روی خرابی‌های مختلف به خوبی بررسی نگردیده‌اند. در این تحقیق تأثیر دو عامل جنس سنگدانه و شرایط پیرشدگی و تأثیر متقابل آنها بر روی دو خرابی مهم بتن آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است. خرابی شن زدگی و ترک خوردگی در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته‌اند. در اثر فشارهای وارده از طریق چرخ وسایل نقلیه سنگدانه‌های به هم چسبیده در بتن آسفالتی از یکدیگر جدا شده و خرابی‌شن‌زدگی^۲ را باعث می‌شوند. این خرابی بیشتر مربوط به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل می‌باشد، اما، مخلوط‌های آسفالتی متراکم نیز مستعد بروز این خرابی‌ها می‌باشند (Abouelsaad and White, 2021). دلیل این خرابی نقص در فصل مشترک اتصال قیر و سنگدانه می‌باشد. بنابراین، هم جنس مصالح سنگی و هم مشخصات قیر در مقاومت مخلوط در برابر این نوع خرابی موثر می‌باشند. یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های مورد استفاده برای ارزیابی مقاومت به شن‌زدگی مخلوط‌های آسفالتی آزمایش افت وزنی کانتابرو می‌باشد. در این آزمایش نمونه‌های متراکم آسفالتی در داخل استوانه دستگاه لس انجلس قرار گرفته و بدون استفاده از گلوله‌های فولادی تحت تعداد معینی از چرخش قرار گرفته و سپس درصد افت وزنی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و به صورت معیاری برای ارزیابی مقاومت به شن‌زدگی استفاده می‌گردد. یکی دیگر از خرابی‌های مهم مخلوط‌های آسفالتی ترک خوردگی می‌باشد. از مهمترین عوامل بروز ترک در مخلوط آسفالتی خستگی و تنش‌های حرارتی ناشی از افت دما می‌باشد. ترک‌ها بعد از ایجاد در بخشی از رویه آسفالتی در اثر اعمال بارهای بیشتر رشد نموده و در تمام عمق لایه آسفالتی گسترش می‌یابند. مقاومت مخلوط آسفالتی به رشد ترک از ویژگی‌های عملکردی مهم مخلوط آسفالتی است که به عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های قیر و سنگدانه و مخلوط بستگی دارد. مکانیزم رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی با تئوری‌های مکانیک شکست توصیف می‌گردد. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی مقاومت به شکست

بلند مدت روسازی با عمر ۹ تا ۱۰ سال پیشنهاد داده اند (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 خاورمیانه 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 کاتالیستی روی فرآیند پیرشدگی دارند (Azimi Alamdari et al., 2019). سولفید آهن در اغلب منابع تولید سنگدانه‌ها به شکل‌های مختلفی مثل پیریت و پیرروتیت موجود است، که می‌توانند 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 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. همانگونه که قبلا ذکر گردید مشخصات مصالح سنگی تاثیر مهمی بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی دارند. خصوصیات مثل بافت سطحی، شکستگی، شکل دانه‌ها، کانی‌شناسی، 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 Yan and Liang, 2001; Kim

فیزیکی و شیمیایی می‌باشند (Sirin et al., 2018). پیرشدگی باعث تغییر در خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی قیر می‌شود. ویسکوزیته، نقطه نرمی، و سختی را افزایش و شکل‌پذیری و درجه نفوذ را کاهش می‌دهد. پیرشدگی همچنین باعث تغییر در خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی می‌گردد. پیرشدگی قیر در مخلوط آسفالتی باعث می‌شود که سختی و پتانسیل ترک خوردگی خستگی و حرارتی و از هم گسیختگی آن افزایش یابد، و دوام آن کاهش یابد که منجر به کاهش عمر روسازی می‌گردد (Rahmani et al., 2017; Bell et al., 1995; Sirin et al., 2018; Lopez-Montero and Miro, 2016).

مطالعه بر روی پیرشدگی قیر در آزمایشگاه با اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت بر روی قیر و یا بر روی مخلوط آسفالتی انجام می‌گیرد. برای مثال، آزمایش‌های پیرشدگی بر روی قیر شامل آزمایش لایه نازک چرخشی^{۱۱} (RTFOT) و لعاب نازک قیر^{۱۲} (TFOT) برای پیرشدگی کوتاه مدت و آزمایش پیرشدگی تسریع شده در ظرف تحت فشار^{۱۳} (PAV) برای ارزیابی پیرشدگی بلند مدت رایج می‌باشند (Azimi Alamdari et al., 2019). در آزمایشهای پیرشدگی بر روی مخلوطهای آسفالتی، معمولا، نمونه‌های سست یا متراکم شده از مخلوط آسفالتی به مدت معینی در دمای مشخصی در داخل گرمخانه قرار می‌گیرند. مطابق توصیه موسسه آشتو و طبق استاندارد AASHTO R30، مخلوطهای آسفالتی سست به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار می‌گیرند تا شرایط پیرشدگی کوتاه مدت را شبیه سازی نمایند. برای شبیه سازی پیرشدگی بلند مدت، مخلوطهای متراکم به مدت ۵ روز در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار می‌گیرند. با توجه به گرادیان اکسیداسیون در جهت قطر و ارتفاع در نمونه‌های متراکم (Houston et al., 2005)، برخی از محققین استفاده از مخلوط سست را برای پیرشدگی بلند مدت توصیه نموده‌اند (Von Quintus et al., 1988; Alwardany et al., 2017). محققین مختلفی در پی یافتن ارتباطی بین شرایط پیرشدگی آزمایشگاه با پیرشدگی در محل روسازی بوده‌اند. بل و همکارانش عمل آوری 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 بهره برداری و دمای ۸۵ درجه به مدت ۴ تا ۸ روز و ۱۰۰ درجه به مدت ۲ تا ۴ روز را برای شبیه سازی پیرشدگی

۲- مواد و مصالح مورد استفاده در تحقیق

مصالح به کار رفته در این پژوهش شامل یک نوع قیر و دو نوع مصالح سنگی می‌باشند. مصالح سنگی آهکی از معدن بناب و مصالح سنگی سیلیسی از معدن سارمساقلودر استان زنجان تهیه گردیده‌اند. جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی آهکی و سیلیسی و جدول ۲ چگالی و جذب آب این مصالح 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 ۳ ملاحظه می‌گردد. دوو و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی دریافتند که اکسیدهای منیزیم (MgO) و کلسیم (CaO) سهم زیادی در ایجاد چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی داشته و هر چقدر مقدار این اکسیدها بیشتر باشد کار چسبندگی افزایش می‌یابد (Du et al., 2019). همانگونه که در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد، در مصالح سنگی آهکی مقدار این اکسیدها بیشتر از مصالح سنگی سیلیسی می‌باشد و بنابراین انتظار می‌رود چسبندگی بهتری با قیر ایجاد نموده و عملکرد بهتری داشته باشد.

به منظور بررسی تاثیر مورفولوژی سنگدانه‌ها بر روی مشخصات عملکردی مخلوط تصاویر میکروسکوپ الکترونی از بخش فیلر و درشت دانه از هر دو مصالح سنگی تهیه گردید که نتایج در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. همانگونه که در تصاویر مشخص است سنگدانه‌های آهکی بافت زبرتر و متخلخل‌تری داشته و انتظار می‌رود باعث ایجاد چسبندگی بیشتری با قیر شوند و تاثیر پیرشدگی بر روی قیر در مخلوط‌های حاوی این سنگدانه‌ها متفاوت باشد.

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 ایثار تبریز مطابق جدول ۳ می‌باشد.

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 از جمله خصوصیت اسیدی-بازی و ویژگی‌های سطحی سنگدانه‌ها و اجزا و خصوصیات قیر بستگی دارد. 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 2007a, 2007b, Liu and You 2011).

تاثیر پیرشدگی بر ویژگی‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند یکسان نباشد و نیاز به بررسی دارد. همچنین، میزان پیرشدگی و تغییر در خواص قیر و تاثیر آن بر خصوصیات مخلوط آسفالتی متأثر از مشخصات سنگدانه‌ها می‌باشد. بررسی ادبیات فنی در موضوع پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که تاثیر پیرشدگی بر مقاومت به شن‌زدگی و مقاومت به شکست از قبیل انرژی شکست و چقرمگی شکست مورد بررسی کافی قرار نگرفته است. از جمله این که چگونگی تاثیر پیرشدگی بر این خصوصیات در انواع مختلف مصالح سنگی در تحقیقات قبلی بررسی نگردیده است. بنابراین، در این تحقیق، برای بررسی این موضوع با دو نوع مصالح سنگی شامل مصالح سیلیسی و آهکی که ترکیبات شیمیایی و مورفولوژی متفاوتی دارند مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده و تحت شرایط مختلف پیرشدگی قرار گرفته و مقاومت به شن‌زدگی و مقاومت به ترک خوردگی با انجام آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه گردیده‌اند.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی آهکی و سیلیسی

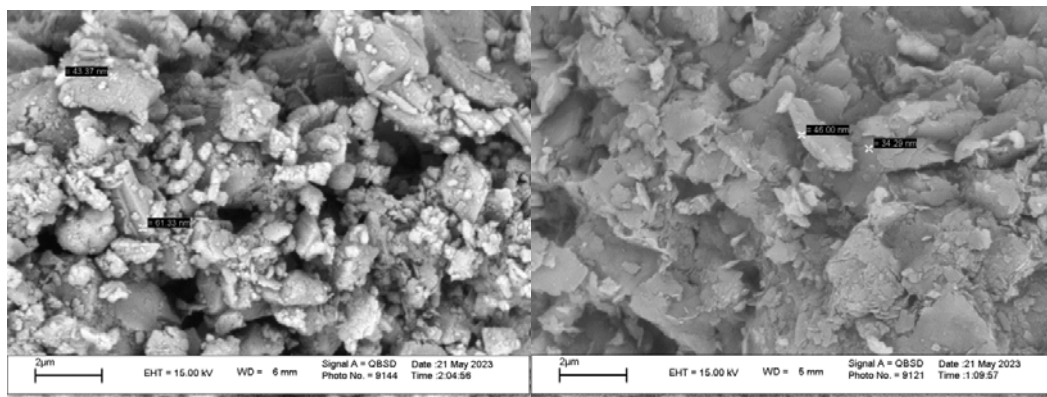
مشخصه	روش آزمایش	نتایج آزمایش مصالح سیلیسی		نتایج آزمایش مصالح آهکی	
		ریزدانه	درشت دانه	ریزدانه	درشت دانه
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس انجلس	AASHTO-T96	-	۱۶	۲۹	-
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176	۵۱	-	-	۷۵
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴	ASTM-D5821	-	٪۹۸ در یک جبهه	در یک جبهه ٪۱۰۰	-
درصد سیلیس مصالح سنگی	-	۵۰٫۷	-	۲۰	-
درصد تورق	BS-812	-	۱۵	۱۹	-
ضریب نرمی ماسه	AASHTO-M6	۳٫۷۶	-	-	۳٫۵۹
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	AASHTO-T104	۰	۱	۱	۱
درصد اندود به قیر مصالح سنگی	ASTM-D1664	جدایی لایه قیر مشاهده نگردید	جدایی لایه قیر مشاهده نگردید	جدایی لایه قیر مشاهده نگردید	جدایی لایه قیر مشاهده نگردید
درصد دانه‌های پهن و دراز	ASTM-D4791	-	۰٫۹	ندارد	-
درصد گوشه داری ریزدانه	ASTM-C1252	۳۷٫۷	-	-	۴۴٫۴

جدول ۲. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

مشخصه	نوع سنگدانه	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		جذب آب %
		ظاهری	واقعی	
مصالح سنگی مانده روی الک ۸	آهکی	۲٫۷۱	۲٫۶۵	۰٫۸
	سیلیسی	۲٫۷۸۶	۲٫۶۴۲	۲
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰	آهکی	۲٫۸۰۵	۲٫۶۲۳	۱٫۲
	سیلیسی	-	-	۲٫۵
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	آهکی	۲٫۷۶	-	-
	سیلیسی	۲٫۶۹۱	-	-
وزن مخصوص واقعی مخلوط مصالح سنگی (G_{sb} (gr/cm ³))	آهکی	-	۲٫۶۵۹	-
	سیلیسی	-	۲٫۶۲۸	-

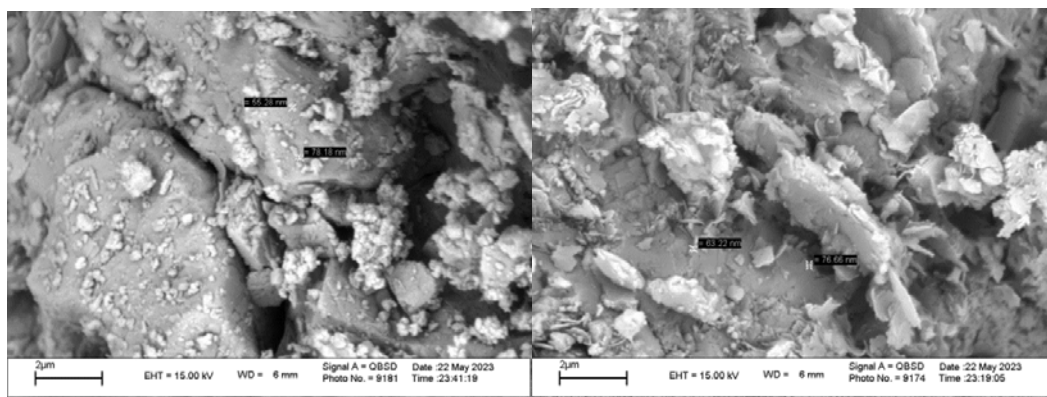
جدول ۳. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سیلیسی

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



ب. فیلر آهکی

الف. فیلر سیلیسی



د. درشت دانه آهکی

ج. درشت دانه سیلیسی

شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی از بخش فیلر و درشت دانه مصالح سیلیسی و آهکی

جدول ۴. مشخصات قیر مورد استفاده در پژوهش

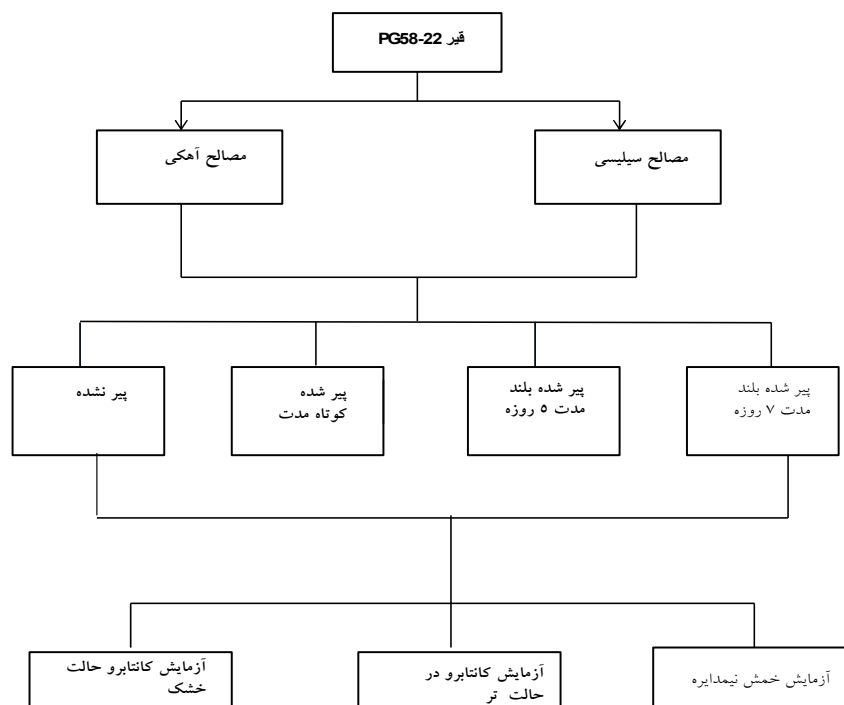
مشخصه	روش آزمایش	نتیجه	حدود آیین نامه
درجه اشتعال (سانتی گراد)	AASHTO-T48	۲۹۲	حداقل ۲۳۰
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد (Pa.s)	AASHTO-T316	۰,۳۰۱	حداکثر ۳Pa.s
$G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتی گراد بر روی قیر پیر نشده (کیلوپاسکال)	AASHTO-T315	۲,۳۸	حداقل ۱
$G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتی گراد بر روی قیر پیر شده کوتاه مدت (کیلوپاسکال)	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 سانتی گراد بر روی قیر پیر شده بلند مدت (کیلوپاسکال)	AASHTO-T315	3790	حداکثر ۵۰۰۰
سختی خزشی در آزمایش رئومتر تیر خمشی در دمای ۱۲ درجه سانتی گراد (مگاپاسکال)	AASHTO-T313	۱۱۶	حداکثر ۳۰۰
مقدار ضریب m در آزمایش رئومتر تیر خمشی	AASHTO-T313	۰,۳۰۱	حداقل ۰,۳

۳- روش تحقیق

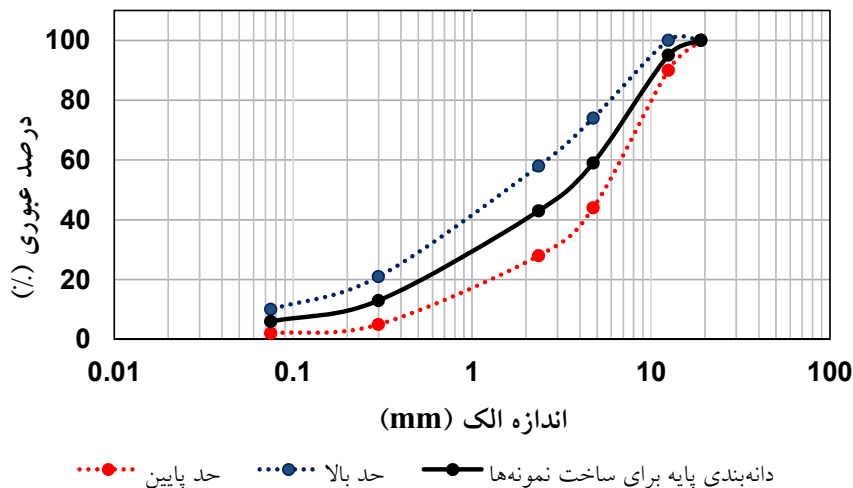
۳-۱- برنامه آزمایش‌ها، طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

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 هرکدام 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 ۲ 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 ۳ محدوده دانه بندی آیین نامه و مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. درصد قیر بهینه برای مخلوط‌ها ۵,۶٪ تعیین

گردیده است. نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای به روش مارشال در اندازه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۶۲,۵ میلی‌متر با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف ساخته شدند. شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی مطابق با استاندارد AASHTO-R30 اعمال گردید. مطابق این استاندارد، جهت شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت، مخلوط غیرمتراکم در ضخامت بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر درون یک سینی پهن شده و به مدت ۴ ساعت در یک محفظه با دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد و به جهت یکنواخت سازی پیرشدگی در کل مخلوط، هر یک ساعت یکبار مخلوط همزده شد. برای شبیه‌سازی پیرشدگی 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 جای‌گذاری گردیدند. در هر حالت نمونه‌های مخلوط تحت آزمایش کانتابرو در حالت خشک و تر و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای قرار گرفته‌اند. 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 ۲. فلوجارت آزمایش‌های تحقیق



شکل ۳. دانه‌بندی مخلوط‌های مورد استفاده در تحقیق

که در آن CL درصد افت وزنی کانتابرو، A وزن اولیه نمونه و B وزن نهایی نمونه می‌باشند.

۳-۲-۲- آزمایش خمش نیم‌دایره ای

آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای به دلیل سادگی در تهیه نمونه و انجام آزمایش محبوبیت زیادی برای ارزیابی ترک خوردگی بتن آسفالتی کسب نموده است. در این تحقیق نیز آزمایش خمش نیم‌دایره ای برای تعیین خصوصیات شکست شامل بار بحرانی، انرژی شکست، چقرمگی شکست و شاخص مقاومت به ترک خوردگی بر روی نمونه‌های آسفالتی انجام گردید. مطابق استانداردهای انجام این آزمایش مانند EN 12697-44; AASHTO TP 105-13; ASTM D8044-16 این آزمایش بر روی نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلی‌متر انجام می‌شود. اما، استفاده از نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر نیز اخیراً استفاده گردیده است. لو و همکارانش (Lu et al., 2021) دریافتند که خصوصیات شکست شامل چقرمگی شکست به دست آمده از نمونه‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تقریباً یکسان است، در حالی که انرژی شکست نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر تقریباً ۲۱٪ کمتر از انرژی شکست نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلی‌متر است و شاخص ترک خوردگی نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلی‌متر تقریباً ۸٪ بیشتر از آن برای نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر است. آنها دریافتند که به طور کلی نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر برای به دست آوردن خصوصیات شکست بتن آسفالتی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر قابل استفاده بوده و قابل تبدیل به مشخصات

۳-۲-۱- آزمایشات انجام گرفته

۳-۲-۱-۱- آزمایش افت وزنی کانتابرو

آزمایش کانتابرو برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل خرابی شن زدگی استفاده می‌گردد. در گذشته بیشتر از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت ساخته شده با دانه‌بندی گسسته و آسفالت متخلخل استفاده می‌شد. اما، در سال‌های اخیر استفاده از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت با دانه‌بندی پیوسته نیز رواج یافته است (Cox et al, 2017; Doyle and Howard, 2016). در این تحقیق، آزمایش کانتابرو برای نمونه‌های خشک طبق استاندارد NLT-352 و برای نمونه‌های مرطوب طبق استاندارد NLT-362 انجام شد. شش نمونه از هر ترکیب با استفاده از ۷۵ ضربه چکش مارشال به طرفین نمونه تهیه گردید. سه نمونه تحت شرایط خشک به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سه نمونه دیگر تحت شرایط مرطوب به مدت ۲۴ ساعت درون آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت درون آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نمونه‌ها در دستگاه لس‌آنجلس مطابق شکل ۴ بدون استفاده از گوی‌های فلزی قرار گرفته و بعد از ۱۰ دقیقه چرخش استوانه با سرعت ۳۰ دور در دقیقه نمونه‌ها بیرون آورده شده و وزن گردیدند. درصد افت وزنی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ گردید.

$$CL = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (1)$$

برای مد اول شکست با استفاده از معادلات ۳ تا ۵ محاسبه گردید (Lim et al., 1993).

$$K_I = \sigma_{\max} Y_1 \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{2rt} \quad (4)$$

$$Y_1 = 4.782 - 1.219(a/r) - 0.063e^{[7.045(a/r)]} \quad (5)$$

که در آن K_I چقرمگی شکست یا ضریب شدت تنش بحرانی بر حسب $\text{N/mm}^{1.5}$ ، حداکثر تنش اعمال شده بر حسب P_{\max} ، N/mm^2 ، حداکثر بار اعمال شده بر حسب نیوتن، r شعاع نمونه بر حسب میلی‌متر، a طول شکاف بر حسب میلی‌متر و t ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر است. شاخص مقاومت به ترک خوردگی (CRI) با استفاده از نمودار بار-جابجایی در آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای با استفاده از معادله ۶ محاسبه گردید. این شاخص توسط کسیر و همکارانش (Kaseer et al., 2018) معرفی گردید تا جایگزین شاخص شکست (FI) که با تقسیم انرژی شکست به شیب در نقطه عطف بعد از شکست محاسبه می‌شود، گردد. این شاخص نسبت به شاخص شکست FI تکرار پذیرتر بوده و آسانتر محاسبه می‌گردد.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{\max}} \quad (6)$$

که در آن G_f انرژی شکست بر حسب ژول بر متر مربع و P_{\max} بار بحرانی بر حسب کیلونیوتن می‌باشد.

برای نمونه‌های استاندارد ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشند. در این تحقیق آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای بر طبق تحقیقات ورارگاون (Veeraragavan, 2016) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد. برای این آزمایش نمونه‌های مارشال با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر برش داده شده و نصف گردیدند. سپس، مرکز نمونه شکاف به طول ۱۵ میلی‌متر و عرض ۱٫۵ میلی‌متر برش داده شد. جهت انجام آزمایش‌های شکست این نمونه‌ها از دستگاه تست یونیورسال با قطر تکیه‌گاهی ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. این آزمایش با اعمال بار تماسی کوچک $0.1 \pm 0.01 \text{ kN}$ و سپس با سرعت بارگذاری با نرخ ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. آزمایش هنگامی متوقف می‌شود که بار به کمتر از ۰/۱ کیلو نیوتن کاهش یابد. در نهایت، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام آزمایش‌ها در یک کامپیوتر ثبت گردید. دستگاه آزمایش و نمونه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است. بعد از انجام آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای بر روی نمونه‌ها، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی^۱ مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای مختلف نظیر بار بحرانی^۲ انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها^۳ و شاخص انعطاف‌پذیری^۴ مورد ارزیابی قرار گرفت (Kaseer et al., 2018). بار بحرانی حداکثر بار عمودی است که می‌تواند توسط نمونه‌ها قبل از شکست تحمل گردد (شکل ۶). انرژی شکست (G_f) بر حسب ژول بر متر مربع که مقدار انرژی لازم برای افزایش واحد سطح در مساحت ترک می‌باشد، با استفاده از معادله ۲ با تقسیم کار شکست (W_f) بر حسب نیوتن بر میلی‌متر، که مساحت زیر منحنی بار-جابجایی می‌باشد (شکل ۶) به مساحت لیگامنت، که حاصل ضرب ضخامت نمونه t بر حسب (میلی‌متر) در اختلاف شعاع نمونه (r) و طول شکاف (a) بر حسب (میلی‌متر) است، محاسبه گردید.

$$G_f = \frac{W_f}{(r-a) \times t} \times 1000 \quad (2)$$

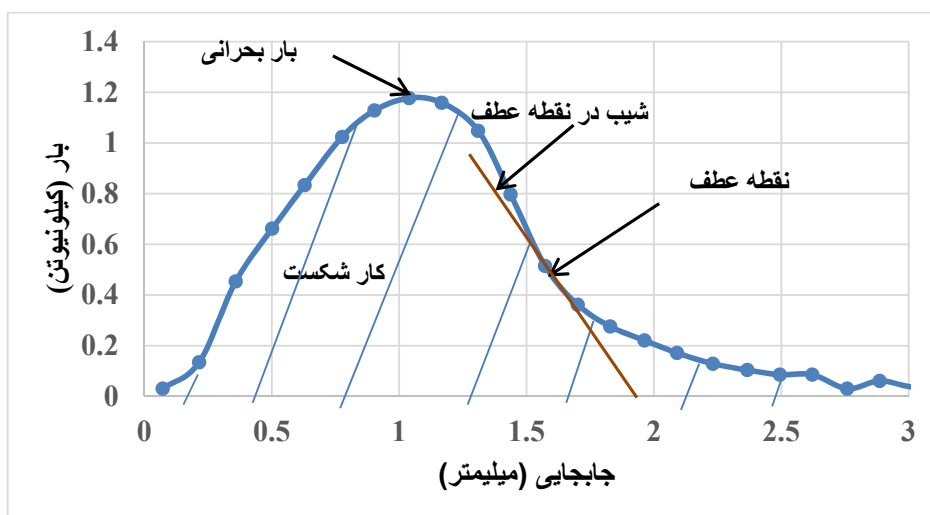
چقرمگی شکست که نشانه‌ای از مقاومت به رشد ترک خوردگی یک ماده شکننده حاوی ترک تحت تنش می‌باشد،



شکل ۴. دستگاه لس انجلس و نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمایش کانتابرو



شکل ۵. آزمایش خمش نیم‌دایره



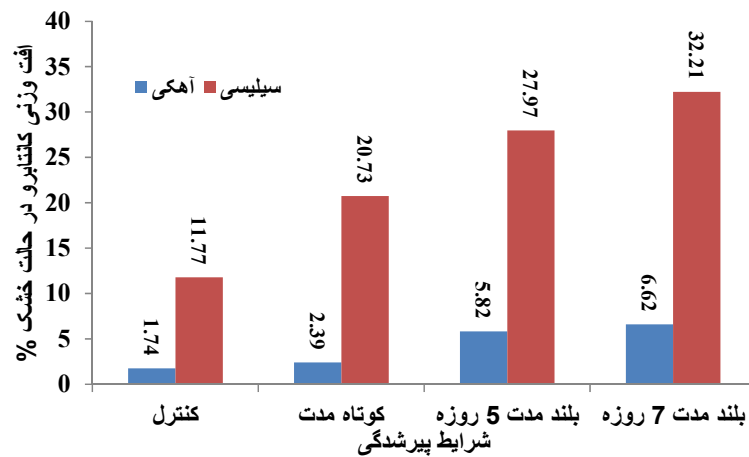
شکل ۶. منحنی بار-جابجایی حاصل از آزمایش خمش نیم‌دایره (شامل پارامترهای حداکثر بار، شیب در نقطه عطف و انرژی شکست)

۴- نتایج و بحث

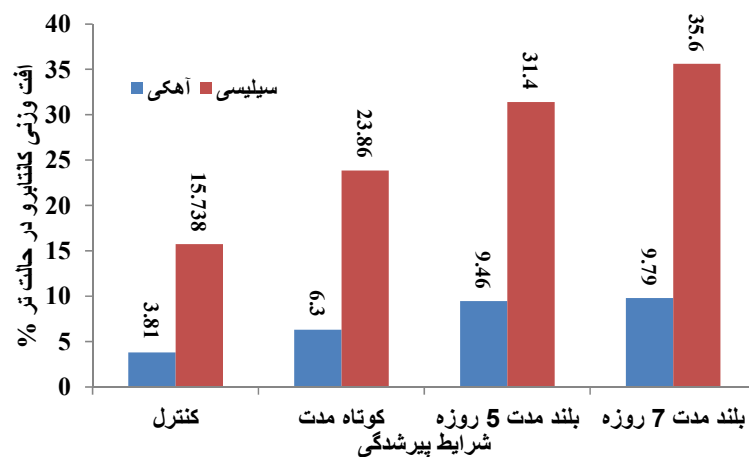
۴-۱- نتایج آزمایش کانتابرو

بیشتر از سیلیسی است. همچنین نتایج شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که پیرشدگی باعث افزایش افت وزنی کانتابرو در مخلوط‌ها می‌شود که با افزایش زمان پیرشدگی مقاومت به شن زدگی به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش چسبندگی و پیوستگی در قیر در اثر اکسیداسیون حاصل پیرشدگی باشد. در تحقیقات قبلی نیز نتیجه گیری گردید که پیرشدگی باعث افزایش افت وزنی کانتابرو می‌گردد (Yan et al., 2021; Abduljabbar et al., 2020). با این وجود، مقدار تاثیر پیرشدگی در دو نوع مخلوط یکسان نیست. به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی، مقدار نسبت افت وزنی کانتابرو بعد از اعمال شرایط پیرشدگی به افت وزنی در مخلوط‌های پیرنشده در دو حالت تر و خشک به عنوان شاخص پیرشدگی محاسبه گردید که نتایج در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، تاثیر پیرشدگی بر مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی بیشتر از مصالح سیلیسی است. راجیب و همکارانش دریافتند که چسبندگی قیر با مصالح سنگی سیلیسی با اکسیداسیون قیر در اثر پیرشدگی بهبود می‌یابد که به دلیل واکنش پذیری زیاد اجزای قطبی قیر با سطح سیلیسی می‌باشد (Rajib et al., 2021). آنها دریافتند که این تاثیر در حضور آب حتی بیشتر می‌باشد. این نتیجه را میتوان اینطور تفسیر کرد که به دلیل پیرشدگی بیشتر قیر در تماس با مصالح سیلیسی میزان واکنش پذیری قیر و مصالح سیلیسی افزایش بیشتری از مصالح آهکی داشته و با پیرشدگی رخ داده افت وزنی به اندازه مصالح آهکی افزایش نیافته است.

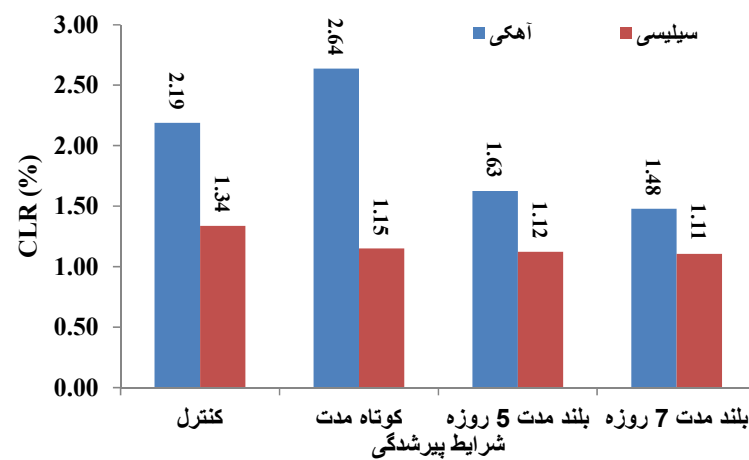
همانگونه که قبلاً ذکر گردید، آزمایش افت وزنی کانتابرو برای تعیین مقاومت به شن‌زدگی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز و پیوسته استفاده می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب، میزان افت وزنی کانتابرو در حالت خشک و تر را برای مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی و عمل‌آوری شده در شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، میزان افت وزنی در حالت خشک و تر برای مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی بیشتر از مخلوط‌های ساخته شده با مصالح آهکی می‌باشد. این موضوع به بافت زبرتر مصالح آهکی و ترکیب شیمیایی مصالح آهکی و ارائه چسبندگی بهتر با قیر ارتباط می‌یابد. همچنین، با مقایسه شکل ۷ و ۸ می‌توان دریافت که قرار گیری در شرایط رطوبت باعث افزایش میزان افت وزنی می‌گردد که به دلیل تاثیر مخرب رطوبت بر چسبندگی قیر به سطح سنگدانه‌ها و پیوستگی قیر می‌باشد. به منظور مقایسه تاثیر رطوبت به مقاومت شن‌زدگی، نسبت افت وزنی در حالت تر به حالت خشک (CLR) محاسبه گردید که نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. مقدار بیشتر نسبت CLR نشان دهنده اثر بیشتر رطوبت می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد میزان تاثیر رطوبت بر مقاومت به شن زدگی در مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از آن بر مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی می‌باشد. این نتیجه خلاف انتظار می‌باشد و دلیلی برای این نتایج یافت نشد. انتظار می‌رفت تاثیر رطوبت بر مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی بیشتر باشد. با این حال، مقاومت به شن زدگی در حالت تر نیز در مخلوط‌های آهکی



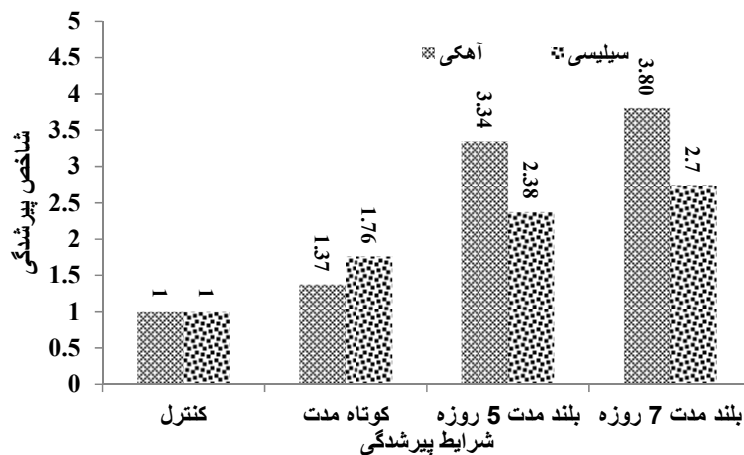
شکل ۷. افت وزنی کانتابرو در حالت خشک



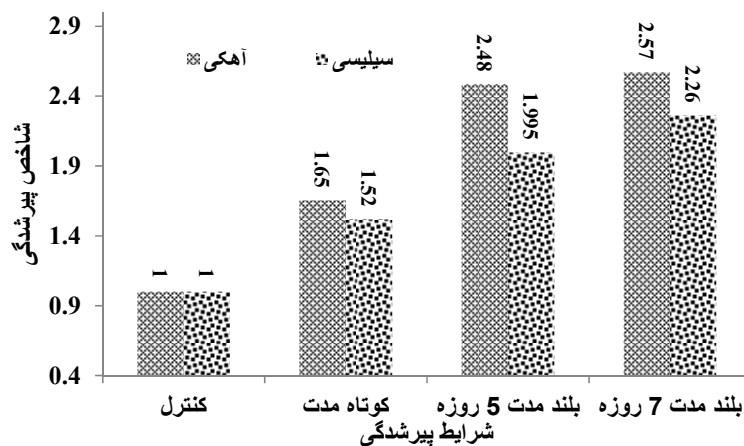
شکل ۸. افت وزنی کانتابرو در حالت تر



شکل ۹. نسبت افت وزنی تر به خشک



شکل ۱۰. شاخص پیرشدگی حالت خشک

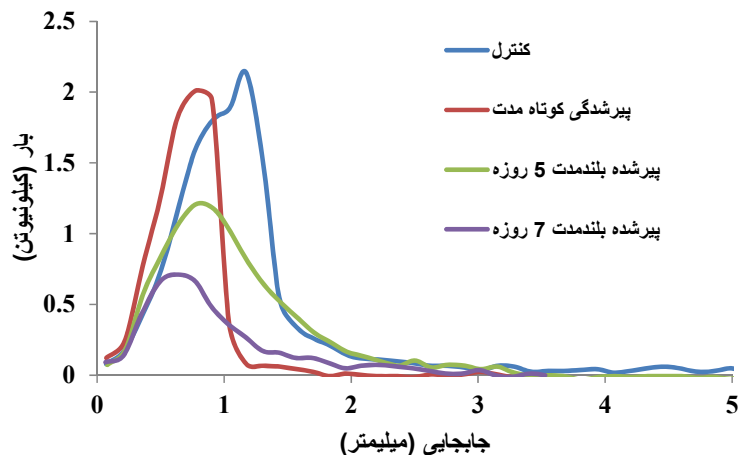


شکل ۱۱. شاخص پیرشدگی حالت تر

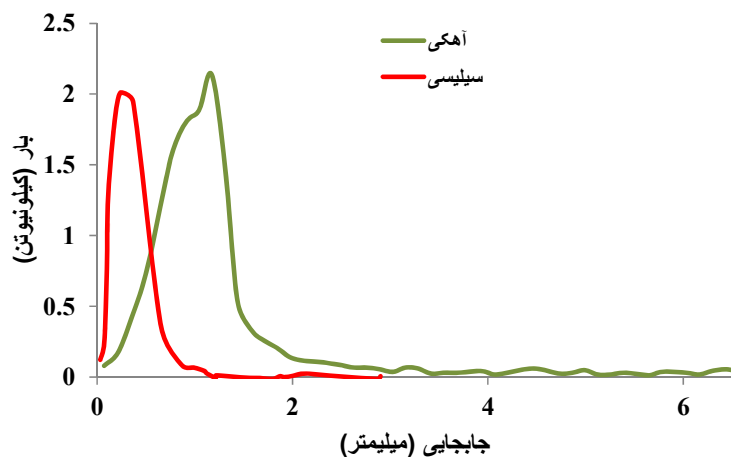
۲-۴- نتایج آزمایش خمش نیمدایره‌ای

بحرانی و جابجایی در لحظه شکست برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی کمتر از آن برای مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی است. با توجه به مشابه بودن قیر و مقدار آن و سایر شرایط، این تفاوت در عملکرد به چسبندگی قیر به سطح سنگدانه‌ها ارتباط می‌یابد که متأثر از بافت سطحی و ترکیب شیمیایی سنگدانه‌ها می‌باشد. مصالح سنگی آهکی به دلیل حالت قلبی بیشتر و بافت زبرتر چسبندگی بهتری با قیر داشته و بار بحرانی، انرژی شکست، چقرمگی شکست و شاخص ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی و تاثیر پیرشدگی بر این ویژگی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

همانگونه که ذکر گردید آزمایش خمش نیمدایره‌ای برای تعیین خواص مربوط به شکست مخلوط‌ها استفاده گردیده است. شکل ۱۲ برای نمونه نمودارهای بار-جابجایی را برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی و تحت شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با اعمال پیرشدگی میزان بار بحرانی و جابجایی در لحظه شکست کاهش می‌یابد که به دلیل تاثیر پیرشدگی بر چسبندگی قیر می‌باشد. همچنین، به منظور مقایسه جنس سنگدانه بر نمودار بار-جابجایی، شکل ۱۳ این نمودارها را برای دو مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی در شرایط بدون اعمال پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، میزان بار



شکل ۱۲. نمودار بار-جابجایی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی



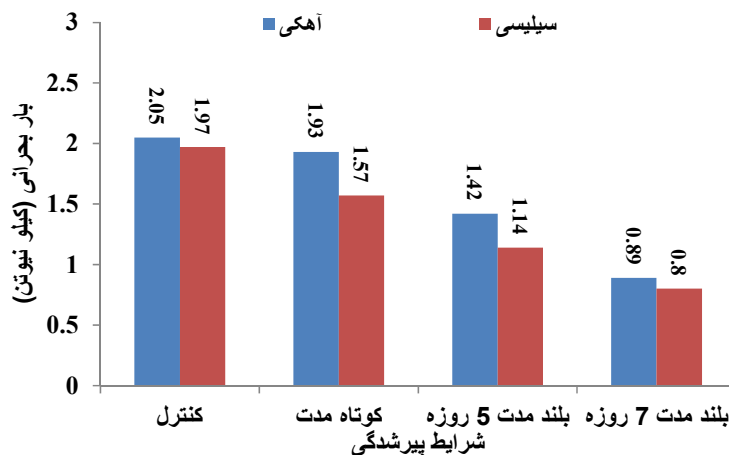
شکل ۱۳. نمودار بار-جابجایی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی

پیرشدگی در بار بحرانی در دو نوع مخلوط یکسان نیست. به منظور بررسی تاثیر شرایط پیرشدگی بر میزان بار بحرانی در مخلوط‌های مختلف شاخص پیرشدگی به صورت میزان بار تحمل شده مخلوط‌ها بعد از پیرشدگی به میزان آن در مخلوط پیرنشده یا کنترل محاسبه گردید که نتایج در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد میزان تاثیر پیرشدگی بر بار بحرانی مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی بیشتر از آن بر بار بحرانی مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی است. همانگونه که قبلاً ذکر گردید تاثیر پیرشدگی بر چسبندگی قیر و سنگدانه تاثیر زیادی از جنس مصالح سنگی و ترکیب شیمیایی خواهد گرفت و هر چقدر چسبندگی بیشتری بین مصالح سنگی و قیر باشد جلوگیری بیشتری از پیرشدگی خواهد شد. مصالح آهکی به دلیل قلیایی بودن و زبری بیشتر سطح

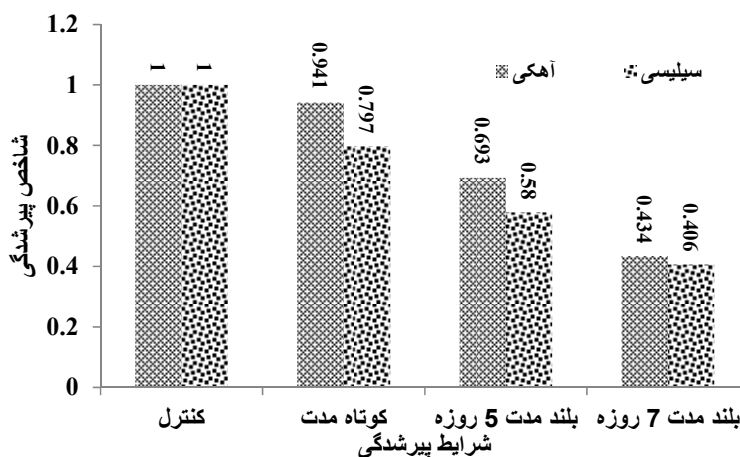
شکل ۱۴ مقدار بار بحرانی تحمل شده توسط مخلوط‌ها را تا لحظه شکست در آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بار بیشتری را نسبت به مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی تحمل می‌کند. همانگونه که قبلاً نیز توضیح داده شد دلیل این موضوع بافت زبرتر مصالح آهکی و ترکیبات شیمیایی آن است که چسبندگی بهتری با قیر ایجاد می‌کند. در شکل همچنین مشخص است که پیرشدگی باعث کاهش مقدار بار تحمل شده می‌شود که به دلیل تاثیر پیرشدگی بر پیوستگی در قیر و چسبندگی قیر و سنگدانه در اثر سخت‌شدگی ناشی از اکسیداسیون می‌باشد. با افزایش زمان پیرشدگی به دلیل اکسیداسیون بیشتر کاهش بیشتری در بار بحرانی مشاهده می‌شود. به دلیل تفاوت در نوع مصالح سنگی میزان تاثیر

است. می‌توان گفت هر خصوصیت عملکردی با درجات مختلفی از چسبندگی و پیوستگی قیر اثر می‌پذیرد. همچنین چسبندگی و پیوستگی قیر نیز بر حسب نوع مصالح سنگی به طور متفاوتی از پیرشدگی اثر می‌پذیرند.

چسبندگی بیشتر با قیر خواهند داشت و پیرشدگی کمتری رخ داده است. اما، تاثیر بر بار بحرانی علاوه بر چسبندگی بین قیر و سنگدانه پیوستگی قیر نیز می‌باشد. در آزمایش کانتابرو ملاحظه گردید که تاثیر پیرشدگی بر افت وزنی در مصالح آهکی بیشتر بود اما در بار بحرانی تاثیر پیرشدگی بر مصالح سیلیسی بیشتر



شکل ۱۴. میزان بار بحرانی مخلوطهای مورد مطالعه



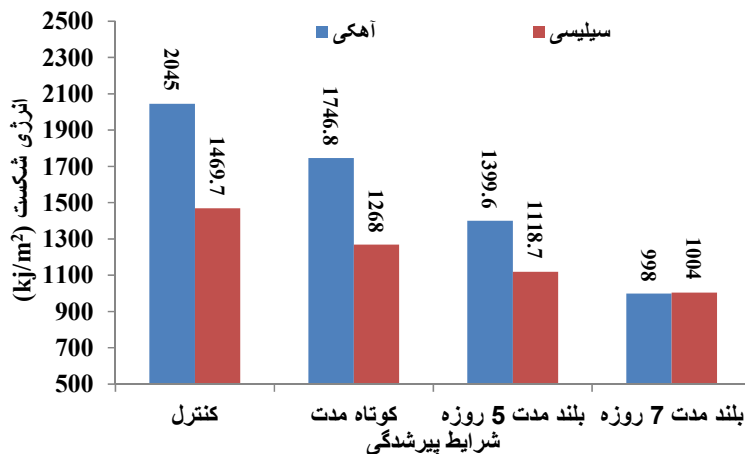
شکل ۱۵. شاخص پیرشدگی برای بار بحرانی مخلوطها

انرژی شکست کاهش می‌یابد، که بیانگر این است که مخلوطهای پیرشده بیشتر مستعد رشد ترک خوردگی می‌باشند. دلیل این موضوع کاهش چسبندگی قیر به دلیل اکسیداسیون می‌باشد. با بیشتر شدن زمان پیرشدگی میزان کاهش در انرژی شکست بیشتر است. این نتیجه با یافته‌های تحقیقات قبلی نیز سازگار است (Das and Siddagangaiah, 2022)، که دریافتند انرژی شکست مخلوطهای ساخته شده با انواع مصالح سنگی و قیر با اعمال پیرشدگی بلند مدت نسبت به پیرشدگی کوتاه مدت کاهش می‌یابد. با اینحال، مشاهده می‌شود

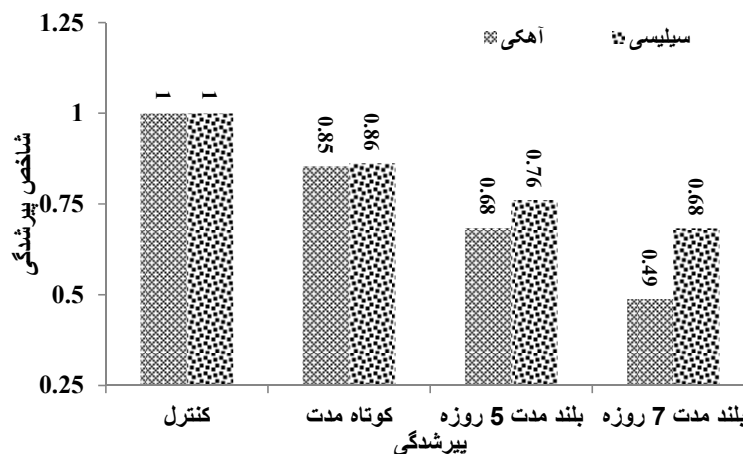
شکل ۱۶ مقدار انرژی شکست مخلوطها را تحت شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، به طور کلی، انرژی شکست مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی می‌باشد. این نتیجه به مورفولوژی و ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها ارتباط می‌یابد. مصالح آهکی به دلیل زبری و زاویه داری بیشتر و چسبندگی بهتر با قیر به دلیل قلیایی بودن باعث می‌شوند انرژی بیشتری برای ایجاد و رشد ترک در آنها نیاز باشد. همچنین، شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با پیرشدگی میزان

انرژی شکست با تقسیم کار شکست، که مساحت زیر منحنی بار-جابجایی است، به مساحت لیگامنت، که برای هر دو مخلوط ثابت است، محاسبه گردیده، می توان گفت که پیرشدگی باعث کاهش بیشتر کار شکست در مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی شده است. با توجه به این که در قسمت قبل ملاحظه شد که بار بحرانی در مخلوط با مصالح آهکی کمتر از آن در مخلوط سیلیسی در اثر پیرشدگی کاهش می‌یابد، پس دلیل کاهش بیشتر کار شکست کاهش بیشتر در جابجایی باید باشد.

که مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی و آهکی به طور یکسان متاثر از پیرشدگی نیستند. برای مقایسه میزان این تاثیر شاخص پیرشدگی با محاسبه نسبت انرژی شکست بعد از اعمال پیرشدگی به انرژی شکست مخلوط پیرنشده محاسبه گردیده است که نتایج در شکل ۱۷ ملاحظه می‌گردد. همانگونه که مشاهده می‌شود، پیرشدگی کوتاه مدت تاثیر مشابهی در هر دو مخلوط داشته است، اما، با افزایش زمان پیرشدگی مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی بیشتر متاثر گردیده‌اند. از آنجایی که



شکل ۱۶. انرژی شکست مخلوط‌های مورد مطالعه در شرایط مختلف پیرشدگی



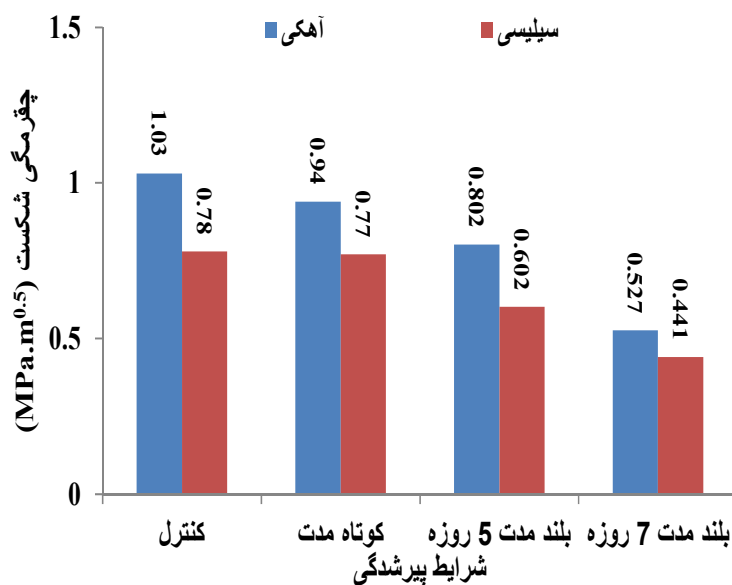
شکل ۱۷. شاخص پیرشدگی محاسبه شده برای انرژی شکست

نتیجه با یافته‌های تحقیقات قبلی سازگار است (Aliha et al., 2015b)، که دریافتند مقدار چقرمگی شکست در مد I برای مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سنگی آهکی بیشتر از مخلوط‌های با مصالح سیلیسی می‌باشد. همچنین، نتایج شکل ۱۸

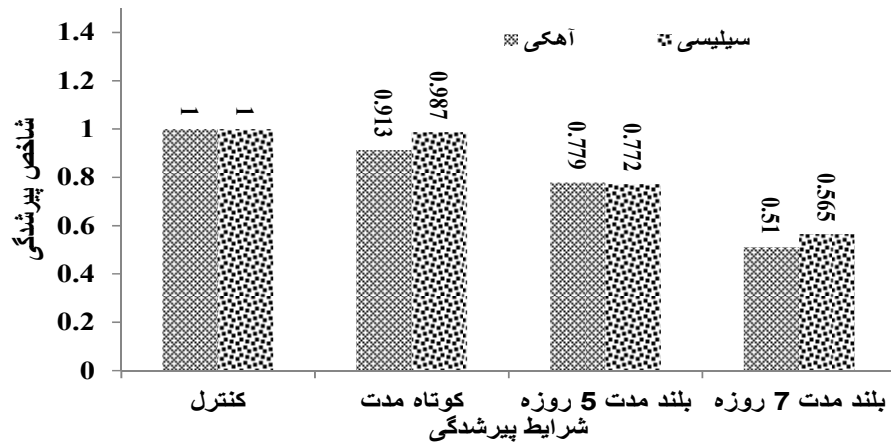
شکل ۱۸ نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌ها را تحت شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مشابه بار بحرانی و انرژی شکست، مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی دارای چقرمگی شکست بیشتری می‌باشند. این

بخشهای قبلی انتظار می‌رود پیرشدگی مقاومت به ترک خوردگی را کاهش دهد. این موضوع به ایرادی که در روش محاسبه CRI وجود دارد ارتباط می‌یابد. در محاسبه CRI فقط انرژی شکست و بار بحرانی لحاظ می‌گردد و شیب منحنی بار-جابجایی بعد از شکست به حساب نمی‌آید. در تحقیقات قبلی نیز به محدودیت شاخص CRI در پیش بینی درست مقاومت به ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی اشاره گردیده است (Majidifard et al., 2021). به منظور بررسی تاثیر شرایط پیرشدگی بر شاخص CRI در مخلوط ساخته شده با دو نوع سنگدانه مختلف، شاخص پیرشدگی با تقسیم مقدار CRI بعد از اعمال پیرشدگی به مقدار آن قبل از اعمال پیرشدگی محاسبه گردید که نتایج در شکل ۲۲ ملاحظه می‌گردد. مطابق این شکل در مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی پیرشدگی باعث افزایش بیشتری در مقدار CRI می‌گردد. این نتیجه نیز در تناقض با نتایج بار بحرانی، انرژی شکست و چقرمگی شکست می‌باشد، که در آنها ملاحظه گردید مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی بیشتر متاثر از پیرشدگی می‌شوند.

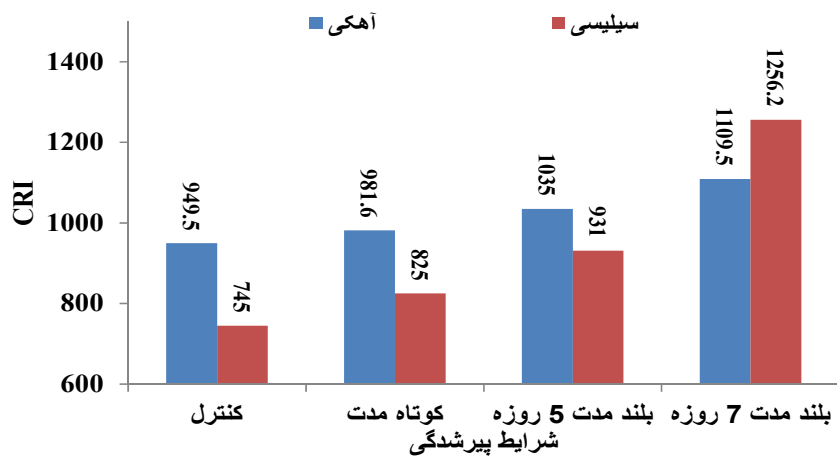
نشان می‌دهند که پیرشدگی باعث کاهش چقرمگی شکست مخلوط‌ها می‌شود. به منظور بررسی تفاوت تاثیر پیرشدگی بر چقرمگی شکست مخلوط‌ها شاخص پیرشدگی با تقسیم چقرمگی شکست هر مخلوط بعد از اعمال شرایط پیرشدگی به چقرمگی شکست مخلوط پیرنشده محاسبه گردید که نتایج در شکل ۱۹ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، تاثیر پیرشدگی بر چقرمگی شکست مخلوط آهکی به مقدار کمی بیشتر از تاثیر آن بر مخلوط ساخته شده با مصالح سیلیسی می‌باشد. شکل ۲۰ شاخص مقاومت به ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را در شرایط مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی شاخص مقاومت به ترک خوردگی بیشتری از مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی دارد، که به خصوصیات مورفولوژی و ترکیب شیمیایی مصالح سنگی و تاثیری که بر پیوند قیر و سنگدانه دارند ارتباط می‌یابد. مطابق شکل ۲۰ می‌توان ملاحظه نمود که پیرشدگی نیز باعث افزایش شاخص مقاومت به ترک خوردگی می‌شود. این موضوع خلاف انتظار می‌باشد، زیرا مطابق سایر خصوصیات بررسی شده در



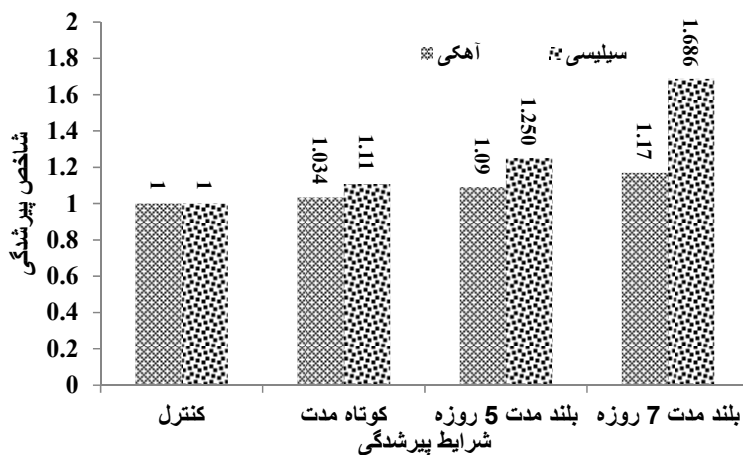
شکل ۱۸. چقرمگی شکست مخلوط‌ها در شرایط مختلف پیرشدگی



شکل ۱۹. شاخص پیرشدگی محاسبه شده برای چقرمگی شکست



شکل ۲۰. شاخص مقاومت به ترک خوردگی مخلوطها



شکل ۲۱. شاخص پیرشدگی برای CRI

۵- نتیجه گیری

-پیرشدگی قیر در مخلوطها باعث کاهش مقاومت به شن زدگی، انرژی شکست، بار بحرانی و چقرمگی شکست در مخلوطها می گردد که به دلیل کاهش چسبندگی قیر در اثر اکسیداسیون ناشی از اعمال پیرشدگی می باشد.

-شرایط یکسان پیرشدگی تغییرات متفاوتی در عملکرد مخلوطهای ساخته شده با دو نوع سنگدانه ایجاد می کند. تاثیر پیرشدگی به نوع عملکرد مورد بررسی و نوع سنگدانه بستگی دارد. مقاومت به شن زدگی مخلوط حاوی سنگدانه آهکی بیشتر از مخلوط ساخته شده با مصالح سیلیسی تحت تاثیر پیرشدگی قرار می گیرد. اما، خصوصیات شکست مخلوط ساخته شده با مصالح سیلیسی بیش از مخلوط ساخته شده با مصالح آهکی تحت تاثیر پیرشدگی قرار می گیرد. دلیل این موضوع تاثیر متفاوت چسبندگی قیر و سنگدانه و پیوستگی قیر بر عملکردهای متفاوت مخلوط بوده و تغییر هر کدام از آنها نیز در اثر پیرشدگی به جنس سنگدانه ها بستگی دارد.

-از نظر کاربردی، نتایج این تحقیق در انتخاب نوع سنگدانه ها می تواند مورد توجه مهندسان قرار گیرد. به طور کلی استفاده از مصالح سنگی آهکی برای داشتن مخلوطی با عملکرد بهتر از نظر مقاومت به شن زدگی و ترک خوردگی توصیه می شود.

در این تحقیق، تاثیر جنس مصالح سنگی در پیرشدگی قیر در 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 مختلف پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت تحت آزمایشهای افت وزنی کانتابرو و خمش نیمدایره ای قرار گرفته و تاثیر پیرشدگی بر مقاومت به شن زدگی و ترک خوردگی در مخلوطهای مختلف بررسی گردید. نتایج مهم زیر از این مطالعه استخراج می گردد.

-مصالح سنگی آهکی به دلیل داشتن مقادیر بیشتری از ترکیبات اکسید منیزیم و اکسید کلسیم و همچنین داشتن سنگدانه های درشت و ریز با بافت زبرتری از مصالح سنگی سیلیسی اندرکنش بهتری با قیر داشته و چسبندگی بهتری با آن ایجاد می نمایند که منجر به داشتن مقاومت به شن زدگی و مقاومت به ترک خوردگی بیشتری در مخلوط آسفالتی ساخته شده با آن می گردد.

۶- پی نوشتها

1. Stone Mastic Asphalt (SMA)
2. Raveling
3. Fracture Energy
4. Fracture Toughness
5. Critical Strain Energy Rate
6. Flexibility Index (FI)
7. Cracking Resistance Index (CRI)
8. Semi-Circular Bending Test (SCB)
9. Short-Term Ageing
10. Long-Term Ageing
11. Rolling Film Oven Test (RTFOT)
12. Thin Film Oven Test (TFOT)
13. Pressure Ageing Vessel (PAV)

۷- مراجع

and testing. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-15.

-Aliha, M. R. M., Fazaeli, H., Aghajani, S., and Nejad, F. M., (2015a). Effect of Temperature and Air Void on Mixed Mode 854 Journal of Testing and Evaluation Fracture Toughness of Modified Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 545-555.

-Abduljabbar, N., Al-Busaltan, S., Dulaimi, A., & Aljawad, O. (2020). Evaluating of Aging Behavior of Thin Asphalt Overlay Modified With Sustainable Materials. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 20, 162-173.

-Abouelsaad, A., & White, G. (2021). Review of asphalt mixture ravelling mechanisms, causes

- Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 24 (2), 8–12.
- Christensen, W. D., Bonaquist, R., and Jack, D. P. (2000). Evaluation of triaxial strength as a simple test for asphalt concrete rut resistance. Final Rep., *Pennsylvania Dept. of Transportation*.
- Cox, B. C., Smith, B. T., Howard, I. L., & James, R. S. (2017). State of knowledge for Cantabro testing of dense graded asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017174.
- Curtis, G.W., (1993). Investigation of asphalt-aggregate interactions in asphalt pavements. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 204 (34), 1292–1298.
- Das, B. P., & Siddagangaiah, A. K. (2022). Identification of parameter to assess cracking resistance of asphalt mixtures subjected to aging and moisture conditioning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 293-304.
- Doyle, J., & Howard, I. (2016). Characterization of dense-graded asphalt with the Cantabro test. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(1), 77-88.
- Du, Z., & Zhu, X. (2019). Molecular dynamics simulation to investigate the adhesion and diffusion of asphalt binder on aggregate surfaces. *Transportation Research Record*, 2673(4), 500-512.
- 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, 279–289.
- Ensley, E.K. and Scholz, H.A., (1972). A study of asphalt-aggregate interactions by heat of immersion. *Journal of the Institute of Petroleum*, 58, 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*, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170.
- 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, 33–39.
- 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 -Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaeli, H., & Rezaifar, M. H. (2015b). Experimental study on mode I fracture toughness of different asphalt mixtures. *Scientia Iranica*, 22(1), 120-130.
- 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, 28–61.
- 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), 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), 623-638.
- Bell, C. A.; Kliwer, J. E. and Sosnovke, D. A. (1995). Investigation of the relationship between field performance and laboratory aging properties of asphalt mixtures. in *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship with Their Performance*, G. A. Huber and D. S. Decker, Eds., ASTM STP 1265, *American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA*.
- 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.
- 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*, [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, Barcelona, Spain, *September*, 83–90.
- Cao, W., Mohammad, L. N., Elseifi, M., Cooper III, S. B., & Saadeh, S. (2018). Fatigue performance prediction of asphalt pavement based on semicircular bending test at intermediate temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018219.
- Chen, G.M. and Tan, Y.Q. (2007). Asphalt mixture performance research based on coarse aggregate surface texture.

- mixtures due to ageing and moisture damage. *Construction and Building Materials*, 112, 299-306.
- Majidifard, H., Jahangiri, B., Rath, P., & Buttlar, W. G. (2021). Development of a balanced cracking index for asphalt mixtures tested in semi-circular bending with load-LLD measurements. *Measurement*, 173, 108658.
- Lu, D. X., Nguyen, N. H., Saleh, M., & Bui, H. H. (2021). Experimental and numerical investigations of non-standardised semi-circular bending test for asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(8), 960-972.
- Mouton, Yves. (2006). Organic materials in civil engineering. UK: **ISTE**.
doi:10.1002/9780470612316.
- 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.
- Rahmani, E.; Darabi, E. M.; Little, D. N. and Masad, E. A. (2017). Constitutive modeling of coupled aging-viscoelastic response of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 131, 1–15.
- Rajib, A. I., Shariati, S., & Fini, E. H. (2021). The effect of progressive aging on the bond strength of bitumen to siliceous stones. *Applied Surface Science*, 550, 149324.
- Safazadeh, F., Romero, P., Mohammad Asib, A. S., & VanFrank, K. (2022). Methods to evaluate intermediate temperature properties of asphalt mixtures *Road Materials and Pavement Design*, by the semi-circular bending (SCB) test. 23(7), 1694-1706.
- 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*.
- Veeraragavan, R. K. (2016). An investigation of the performance of hot mix asphalt (HMA) binder course materials with high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) and rejuvenators. *A report submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute*, MA, US.
- 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.
- service. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(6), 541–553.
doi:10.1080/10298436.2010.488729.
- Hofman, R., Oosterbaan, B., Erkens, S., and Kooij, J., (2003). Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth. Proceedings of the 6th RILEM Conference on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, Switzerland, April 16, Springer, New York, 257–263.
- Houston, W. N., Mirza, M. W., Zapata, C. E. and Raghavendra, S. (2005). 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.
- Kaseer, F. Yin, F. Arambula-Mercado, E. Martin, A. E. Daniel, J. S. Salari, S. (2018). Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test, *Construction and Building Materials*, Vol. 167, 286–298.
- Kavussi, A.; Qazizadeh, M. J. (2014). Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging, *Construction and Building Materials* (72), 158-166.
- Kim, Y.R., Little, D.N. and Song, I., (2003). Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: mechanistic evaluation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832, 1–8.
- Lesueur, D. and Little, D.N., (1998). Effect of hydrated lime on rheology, fracture, and aging of bitumen. *Transportation Research Record*, 1661, 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.
- Lim I, Johnston I, Choi S. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engage Fact Mach*, 44(3), 363–82.
- 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, 294–303.
- López-Montero, T., & Miró, R. (2016). Differences in cracking resistance of asphalt

- Road Materials and Pavement Design*, 22(8), 1824-1841.
- 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), 25–27.
- 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), 239–252.
- 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), 1519–1528.
- Wang, H., Zhang, C., Li, L., You, Z., & Diab, A. (2016). Characterization of low temperature crack resistance of crumb rubber modified asphalt mixtures using semi-circular bending tests.
- 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 Southeast University (Natural Science Edition)*, 34 (4), 485–489.
- Yan, C., Huang, W., Zheng, M., Zhang, Y., & Lin, P. (2021). Influence of ageing on high content polymer modified asphalt mixture stripping, cracking and rutting performances.

Investigating the Effect of Asphalt Ageing on the Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Made by Limestone and Siliceous Aggregates

Seyyed Amir Hoessein Beheshti, Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

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

Alireza Sarkar, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Parham Hayati, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

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

Received: September 2003 Accepted: January 2024

ABSTRACT

In this research the effects of different aging conditions on the raveling and cracking resistance of asphalt concrete made by two types of aggregates, namely limestone and siliceous source have been investigated. Asphalt samples made by siliceous and limestone aggregates were made and were subjected to short-term and 5 and 7-day long-term aging conditions. After that, they were tested using Cantabro mass loss and semi-circular bending test at ambient temperature. Results reveal that the mixture made by limestone aggregates has more raveling and cracking resistance than the mixture made by siliceous aggregates. These results were found to be due to rougher texture and more angularity of limestone particles and also having more MgO and CaO content in their chemical compositions. Results also reveal that aging results in reduction of raveling resistance, fracture energy, fracture toughness, ductility and critical load sustained before fracture in semi-circular bending test. The effect of aging on these properties was found to be dependent on the type of aggregates and the considered property. In terms of raveling resistance, the aging is more effective on the mixture made by limestone aggregates; however, the fracture properties and cracking resistance of the mixture made by siliceous aggregates are more affected by aging than the mixture made by limestone aggregates.

Keywords: Asphalt Concrete, Aging, Limestone Aggregates, Siliceous Aggregates, Raveling, Semi-Circular Bending