

ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خزشی بتن آسفالتی پیر شده با لحاظ تأثیر جنس مصالح سنگی

غلامعلی شفافبخش*، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
محمد قنبریان، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه سمنان

Email: shafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۴/۱۰ - پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۵

چکیده

عواملی از قبیل تبخیر مواد فرار قیر و اکسیداسیون آنها در روند اختلاط قیر با سنگدانه، حمل آن به محل پروژه و همچنین در طول عمر سرویس‌دهی روسازی، منجر به پیرشدگی قیر می‌گردند و می‌توانند زمینه‌ساز ایجاد برخی از خرابی‌های روسازی آسفالتی باشند. در اثر پیرشدگی، قیر شکننده شده و به مرور زمان ترک‌هایی در سطح روسازی مشاهده می‌گردد که وجود این ترک‌ها، ضمن کاهش کیفیت رانندگی، سبب افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی می‌گردد. شیارشدگی نیز از سری خرابی‌هایی به شمار می‌آید که ضمن کاهش ایمنی سفر، هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها را افزایش می‌دهد. از سری عواملی که با شناخت بیشتر آنها می‌توان روسازی‌هایی با عمر طولانی مدت طراحی کرد، مشخصات اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی، یعنی ماده چسباننده قیری و مصالح سنگی می‌باشند. با توجه به اینکه تحقیقات کمی در مورد تأثیر خصوصیات فیزیکی مخلوط، از قبیل جنس مصالح سنگی، بر پارامترهای مقاومتی آن صورت گرفته، در این پژوهش، تأثیر جنس مصالح سنگی بر قابلیت خزشی مخلوط آسفالتی گرم پیر شده مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های آسفالتی با دو نوع مصالح سنگی آهکی و سیلیسی ساخته شده و تحت روند پیرشدگی بر اساس روش استاندارد مربوطه قرار گرفته‌اند. سپس، نمونه‌های آسفالتی تحت آزمون خزش دینامیک در تنش‌های ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و کرنش‌های پایدار آنها اندازه‌گیری شده است. نتایج توسط نرم‌افزار متلب آنالیز شده و مدل آزمایشگاهی رفتار خزشی بتن آسفالتی پیر شده، با لحاظ تأثیر جنس مصالح سنگی، ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های آهکی، نسبت به نمونه‌های سیلیسی، مقاومت بیشتری را در برابر تغییر شکل ماندگار وابسته به زمان از خود بروز می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: پیرشدگی آسفالت، مخلوط آسفالتی، قابلیت خزشی، جنس مصالح سنگی

۱. مقدمه

فرودگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طوری که اولین خیابان‌های آسفالتی، در شهرهایی مانند پاریس، در اواخر قرن ۱۹ رواج پیدا کردند (رضوی‌نیا، ۱۳۹۱). مخلوط‌های بتن آسفالتی شامل سه گروه مخلوط‌های سرد (CMA)، گرم (WMA) و داغ (HMA) می‌باشند

به طور کلی، سه نوع روسازی بتن آسفالتی، بتن سیمانی پرتلند و روسازی مرکب وجود دارد (پاپاجیاناکیس و مصعد، ۲۰۰۸). بتن آسفالتی از جمله مصالحی است که به میزان زیادی در روسازی راه و

روسازی عبارتند از: شیارشدگی، ترک‌های خستگی، ترک‌های حرارتی، پیرشدگی و خرابی‌های ناشی از رطوبت. نکته قابل توجه اینجاست که این محققین، پیرشدگی قیر را به عنوان یک خرابی معرفی کرده‌اند (شیخ متولی، ۱۳۹۰). لازم به ذکر است که پیرشدگی قیر با وجود اینکه سبب تغییر خصوصیات قیر و کاهش برخی از خرابی‌ها می‌شود، به عنوان یکی از خرابی‌ها در روسازی آسفالتی مطرح نیست (گلستانی، ۱۳۸۹). اکسیداسیون قیر، یکی از عوامل اصلی دخیل در ایجاد خرابی روسازی‌های آسفالتی می‌باشد (کُنگ و همکاران، ۲۰۱۰).

۱-۲. شیارشدگی مسیر چرخ‌ها

شیارشدگی در مصالح روسازی، با افزایش تعداد اعمال بار، به صورت تدریجی ایجاد شده و معمولاً به صورت تورفتگی‌های طولی در مسیر چرخ‌ها، همراه با برآمدگی‌های کوچک در کناره آن نمایان می‌شود. این خرابی به مرور زمان و به علت تجمع تغییرشکل‌های ماندگار کوچک، که در هر بارگذاری به وجود می‌آید، ایجاد می‌شوند (براون و کندهال، ۲۰۰۱). شیارشدگی ناشی از این تغییرشکل‌ها در جاده‌هایی که در معرض دماهای زیاد (آب و هوای گرم) و حرکت کند کامیون‌ها قرار دارند، عاملی خطرناک به شمار می‌رود. بنابراین، مخلوط‌های آسفالتی بایستی با هدف مقاومت بالا در برابر تغییرشکل‌های ماندگار، بدون اینکه تأثیری بر سایر خواص مورد نیاز جهت مقاومت در برابر خستگی، پیرشدگی و اثرهای ناشی از عریان‌شدگی داشته باشد، طراحی و اجرا گردند (رضوی‌نیا، ۱۳۹۱). شیارشدگی در بزرگراه‌ها، به دلیل تعداد خطوط حرکت و تکرر عبور و مرور زیاد، نسبت به فرودگاه‌ها بیشتر دیده می‌شود، چرا که در فرودگاه‌ها تعداد تکرر عبور و مرور هواپیما کمتر بوده و خطوط حرکت کمتری وجود دارد (عربانی و همکاران، ۲۰۱۰). خصوصیات خزشی

(جنکس و همکاران، ۲۰۱۱). آسفالت سرد از اختلاط سنگدانه‌ها با قیرهای محلول یا قیرآبه‌ها در دمای محیط تهیه و در همین دما پخش و متراکم می‌شود. آسفالت سرد را می‌توان در مسافت‌های زیاد حمل و سپس پخش کرد و یا آن را در کارگاه انبار نمود و بعداً مورد استفاده قرار داد (نشریه ۲۳۴). آسفالت نیمه‌گرم، نسل جدیدی از مخلوط‌های آسفالتی، با کیفیتی مشابه و برابر مخلوط‌های HMA می‌باشد، با این تفاوت که در دمایی کمتر (حدود ۳۰ تا ۱۰۰ درجه فارنهایت) نسبت به مخلوط‌های آسفالتی گرم تولید می‌شود (جنکس و همکاران، ۲۰۱۱). آسفالت گرم عمدتاً به صورت قشر رویه (توپکا) و قشر آستر (بیندر) در روسازی به کار می‌رود. آسفالت رویه، آخرین قشر بتن آسفالتی است که در تماس مستقیم با بارهای وارده از ترافیک و عوامل جوی محیط قرار می‌گیرد (نشریه ۲۳۴). مصالح سنگی حدود ۹۵٪ و قیر حدود ۵٪ از وزن مخلوط‌های HMA را شامل می‌شوند. به لحاظ حجمی، ۸۵٪ حجم یک مخلوط HMA را مصالح سنگی، ۱۰٪ آن را قیر و ۵٪ باقیمانده را فضا‌های خالی تشکیل می‌دهند (جنکس و همکاران، ۲۰۱۱). برای اینکه بتن آسفالتی گرم، با توجه به شرایط جوی و ترافیکی بتواند عملکرد مناسبی را نشان دهد، باید دارای مشخصات و خصوصیات معینی باشد. این خصوصیات از یک طرف به جنس مصالح سنگی و نوع قیر و از طرف دیگر به دانه‌بندی، نسبت اختلاط مصالح و قیر و همچنین نحوه اختلاط، پخش و کوبیدن بستگی دارد. بنابراین، برای تهیه بتن آسفالتی گرم با مشخصات مناسب، لازم است که مواد تشکیل‌دهنده آن، یعنی مصالح سنگی و قیر، هر یک دارای مشخصات مناسب بوده و از آیین‌نامه‌های معتبر پیروی کنند (لطفی، ۱۳۹۰).

۱-۱. خرابی‌های بتن آسفالتی

بر اساس گزارش محققین شارپ، خرابی‌های عمده

شیارشدگی می‌شود (حمزه و عمرانیان، ۲۰۱۵). جنس مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی، نقش مهمی در کنترل شیارشدگی این مخلوط‌ها دارد (الخطیب و همکاران، ۲۰۱۳).

۱-۳. پیرشدگی قیر

عمر سرویس‌دهی روسازی وابسته به پارامترهای زیادی می‌باشد. یکی از این پارامترها که در اثر تبخیر و اکسیداسیون قیر اتفاق می‌افتد، پیرشدگی قیر است. سخت شدن (پیرشدگی) قیر از پدیده‌هایی است که تحت شرایط و عوامل مختلف، در کوتاه‌مدت و یا بلندمدت اتفاق می‌افتد. علت این امر، تغییرات سریع و یا تدریجی در شکل و ترکیبات شیمیایی قیر در اثر عوامل مختلف می‌باشد. فرایندهایی از قبیل تصعید مواد فرار و سبک قیر و اکسیداسیون، سبب تغییرات شیمیایی در قیر می‌شوند. کلیه این فرایندها تابع شرایط محیطی، دما و ضخامت غشای قیر روی سنگدانه‌ها می‌باشند. به طوری که با افزایش دما و کاهش غشای قیر پوشاننده مصالح سنگی، سرعت اکسیداسیون و در نتیجه سرعت پیرشدگی قیر افزایش می‌یابد. در دماهای بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس، به ازای هر ۱۰ درجه افزایش دما، سرعت اکسیداسیون دو برابر می‌شود. سخت شدن قیر و تغییرات ناشی از آن، عملاً در دو شرایط مشخص و کاملاً متفاوت به شرح زیر در قیر ظاهر می‌شود:

مرحله اول: در فاصله زمانی کوتاه بین گرم کردن قیر و اختلاط آن با مصالح سنگی در دمای زیاد و حمل آن از کارخانه تا محل پروژه، قیر با سرعت و شدت زیاد و در یک زمان کوتاه سخت می‌شود. به این مرحله از سخت‌شدگی قیر، پیرشدگی کوتاه‌مدت گفته می‌شود. با کاهش سطح تماس قیر با هوا، می‌توان تبخیر مواد فرار و اکسیداسیون قیر را کاهش داد.

مرحله دوم: این مرحله شامل سخت شدن قیر در طول دوره سرویس‌دهی روسازی می‌باشد که به تدریج و

مخلوط‌های آسفالتی (قابلیت خزشی) برای تخمین عمق گودی مسیر چرخ ناشی از بارهای ترافیکی در سازه‌های روسازی انعطاف‌پذیر به کار می‌رود. توانایی تخمین میزان تغییرشکل و یا شیارشدگی و رشد آن در روسازی‌های انعطاف‌پذیر از مفاهیم مهم در طرح روسازی‌ها به‌شمار می‌رود (شفابخش و ساجد، ۲۰۱۴).

استفاده از دانه‌بندی پیوسته در افزایش استحکام مخلوط در برابر شیارشدگی تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین، در خصوص مصالح سنگی، چگالی بیشتر، بافت زبرتر و خشن‌تر و گوشه‌داری بیشتر، سبب کاهش میزان شیارشدگی می‌گردد. در شرایط آب و هوایی گرم، استفاده از قیرهای سخت‌تر در کاهش میزان شیارشدگی مؤثر است. از سوی دیگر، میزان بالای قیر مصرفی، مقاومت در برابر شیارشدگی را کاهش می‌دهد (رضوی-نیا، ۱۳۹۱؛ عامری و همکاران، ۱۳۸۹). مخلوط‌های با دانه‌بندی بیش از حد درشت و یا بیش از حد ریز، مقاومت مطلوبی در مقابل شیارشدگی از خود نشان نمی‌دهند. به طور کلی، میزان ریزدانه بیشتر و در عین حال تعادل میان توزیع درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر سبب می‌شود که نمونه آسفالتی مقاومت خوبی در برابر شیارشدگی داشته باشد. این مطلب بدین معناست که لزوم ریزدانه بالا تضمین‌کننده مقاومت خوب در برابر شیارشدگی نبوده و توزیع مناسب سنگدانه‌ها پارامتری اثرگذار است (عامری و همکاران، ۱۳۸۹). کاهش بیش از حد فضاهای خالی در مخلوط آسفالتی می‌تواند سبب افزایش درصد قیر در این مخلوط‌ها گردد. به طوری که افزایش درصد قیر منجر به نرم‌تر شدن نمونه شده و افزایش پتانسیل شیارشدگی را به همراه دارد. بر اساس تحقیقات NCHRP، مخلوط آسفالت گرم دارای ضخامت غشای بیشتر از ۹ تا ۱۰ میکرون مستعد خرابی شیارشدگی می‌باشد (جنکس و همکاران، ۲۰۱۱). قیر بیش از حد، به دلیل پایین آوردن فضاهای خالی و در نتیجه کاهش سختی، منجر به تولید مخلوطی مستعد

آرام آرام صورت می‌گیرد و به پیرشدگی بلندمدت معروف است. مخلوط‌های آسفالتی در طول عمر سرویس‌دهی و تحت شرایط مختلف محیطی در اثر اکسیداسیون، پیرشدگی را تجربه می‌کنند. اکسیداسیون، یک واکنش شیمیایی بین قیر و اکسیژن است که سختی قیر و خصوصیات فنی مخلوط‌های آسفالتی را تغییر می‌دهد. سخت‌شدگی قیر، به دلیل دخیل بودن فاکتورهای محیطی متنوع، یک پدیده بسیار پیچیده می‌باشد (مالیک و ال‌کورچی، ۲۰۱۳؛ ایم و ژو، ۲۰۱۳). تابش نور خورشید و تابش ماوراء بنفش نیز باعث پیرشدگی قیر در طول عمر سرویس‌دهی روسازی آسفالتی می‌شوند (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵). به طوری که با قرار گرفتن طولانی مدت روسازی در معرض این عوامل، مخلوط آسفالتی سخت شده و قابلیت ترک خوردگی پیدا می‌کند (سانچز و همکاران، ۲۰۱۵).

به طور کلی، حداکثر سخت‌شدگی قیر، در موقع اختلاط آن با مصالح سنگی در کارخانه و در دمای زیاد صورت می‌گیرد. ولی تحت شرایط نامناسب، این سخت‌شدگی می‌تواند در جاده و حین دوره سرویس‌دهی روسازی نیز اتفاق بیافتد. عامل اصلی سخت‌شدگی قیر در دوره سرویس‌دهی روسازی، میزان حفره‌های موجود در رویه آسفالتی می‌باشد.

سخت شدن قیر سبب کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی، افزایش ویسکوزیته، کاهش خاصیت چسبندگی و افزایش قابلیت شکنندگی آن می‌گردد (گلستانی، ۱۳۸۹؛ رضانی، ۱۳۹۰). پیرشدگی قیر یک فرایند اکسیده شدن شیمیایی است که منجر به تشکیل اجزای کربونیل و سولفور اکسید می‌گردد که همین امر خصوصیات سختی، چسبندگی و انعطاف‌پذیری قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، پیرشدگی قیر اثر مستقیمی بر عملکرد روسازی می‌گذارد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵). "ویم" طی تحقیقاتی که انجام داد به این نتیجه رسید که با کاهش اندازه ذرات، ضخامت قیر

روی سطح مصالح سنگی کاهش می‌یابد. همین امر باعث می‌شود که در صورت نفوذ هوا به درون مخلوط متراکم شده، سرعت اکسیداسیون قیر افزایش یافته و باعث ترد و شکننده شدن مخلوط آسفالتی گردد (سنگ سفیدی، ۱۳۹۰). در مطالعه‌ای، شیائو و همکاران (۲۰۱۵)، خصوصیات رئولوژیک قیرهای مختلف دارای افزودنی نیمه‌گرم را پس از پیرشدگی بلندمدت به دو روش تابش ماوراء بنفش (UV) و محفظه فشار پیرشدگی (PAV)، با استفاده از آزمایش‌های رئومتر برش دینامیک (DSR) و رئومتر تیر خمشی (BBR) مورد بررسی قرار دادند. طرح آزمایشگاهی شامل دو قیر با درجه عملکردی PG76-22 (تهیه شده از دو منبع A و B) و PG64-22 (تهیه شده از دو منبع C و D) و چهار افزودنی شامل ساسوبیت، ردیست، سسابیس و اووترم بود. نتایج نشان داد که جنس و نوع قیر استفاده شده تأثیر قابل توجهی بر هر دو روش پیرشدگی دارد. مقادیر مدول ویسکوز $(G^* \sin \delta)$ و مدول الاستیک $(G^* \cos \delta)$ نیز وابسته به جنس و نوع قیر می‌باشند و مقدار افزودنی تأثیر ناچیزی بر این دو پارامتر دارد. همچنین، قیرهای پیر شده به روش UV مقاومت در برابر ترک خوردگی بیشتری دارند. در این مطالعه، روش UV جهت بررسی خصوصیات رئولوژیک قیر WMA مناسب شناخته شد. در مطالعه‌ای، ونگ و همکاران (۲۰۱۵)، پیرشدگی قیر اصلاح شده SBS را مورد بررسی قرار دادند. جهت مقایسه تفاوت‌ها و تشابهات قیر اصلی و قیر اصلاح شده SBS، هر دو به صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت تحت پیرشدگی قرار گرفتند. آزمایش لعاب نازک چرخشی قیر (RTFO) مطابق با استاندارد ASTM D2872 برای شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت و آزمایش محفظه فشار پیرشدگی (PAV) مطابق با استاندارد ASTM D6521 برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در هر دو قیر اصلی و قیر اصلاح

کردند. در این مطالعه، جهت بررسی اثر رطوبت بر پیرشدگی قیر در شرایط میدانی، آزمایش PAV برای شرایط رطوبتی تصحیح شده بود. به این صورت که برای واکنش سطحی قیر- آب در طول آماده‌سازی، ۱۰ گرم آب به نمونه قیری اضافه شد و همچنین فشار هوا در طول فرایند پیرشدگی که ۲/۱ مگاپاسکال بر طبق استاندارد ASTM D6521 تعریف شده است با ۰/۲ مگاپاسکال بخار آب به داخل محفظه پیرشدگی اصلاح شده بود. آزمایش‌های پیرشدگی اصلاح شده و اصلاح نشده، که به ترتیب آزمایش محفظه فشار پیرشدگی در حالت رطوبت و آزمایش محفظه فشار پیرشدگی در حالت خشک نامیده می‌شوند، در چهار زمان پیرشدگی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساعت روی دو قیر مذکور انجام شد. نتایج نشان داد که فاکتورهای متنوعی از قبیل دما، فشار هوا، رطوبت و اکسیژن، تأثیر متقابلی بر روند پیرشدگی قیر دارند. شرایط رطوبتی به همراه حرارت و اکسیژن، قیر را سخت‌تر و شکننده‌تر می‌کند که تمایل آن به ترک خوردگی دمای کم بیشتر می‌گردد. بنابراین، رطوبت تأثیر به‌سزایی بر پیرشدگی بلندمدت قیر و تأثیر منفی بر دوام روسازی‌های آسفالتی دارد. همچنین، در قیر اصلاح شده، اصلاح‌کننده نقش ضد اکسید شدن را بازی می‌کند و سرعت پیرشدگی را کاهش می‌دهد (ما و همکاران، ۲۰۱۱).

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، تا کنون کمتر تحقیقاتی در مورد تأثیر خصوصیات فیزیکی مخلوط از قبیل جنس مصالح سنگی بر پارامترهای مقاومتی آن صورت گرفته است. بنابراین، در این پژوهش، تأثیر جنس مصالح سنگی بر قابلیت خزشی مخلوط آسفالتی گرم پیرشده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

قیر مورد استفاده در این تحقیق، قیر ۶۰-۷۰ بوده و

شده SBS، با افزایش روند پیرشدگی، میزان آسفالتین‌ها افزایش می‌یابد که با افزایش آسفالتین‌ها، کربونیل‌ها نیز افزایش یافته و قیرها سخت می‌شوند. همچنین، میزان آروماتیک‌ها در این دو قیر با افزایش روند پیرشدگی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر، لی و همکاران (۲۰۱۵)، عملکرد مخلوط ملات مصالح ریزدانه (FAM) شامل سه نوع قیرسنگ UM، QC و Buton را مورد بررسی قرار دادند. خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط در دو حالت استفاده قیرسنگ و عدم استفاده از آن توسط دو آزمایش DSR و BBR بررسی شده بود. نتایج نشان داد که با افزایش میزان قیرسنگ، مدول برشی دینامیک (G^*) به طور مؤثری افزایش می‌یابد که این افزایش در مدول برشی برای بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مطلوب می‌باشد. همچنین، خصوصیات رئولوژیک مخلوط‌های FAM دارای قیرسنگ، به دلیل اینکه خود قیرسنگ‌ها به طور طبیعی پیر شده هستند، تأثیرپذیری کمتری از پیرشدگی بلندمدت در مقایسه با مخلوط‌های کنترل دارند. با توجه به نتایج BBR، هر سه قیرسنگ خصوصیات دمای پایین یکسانی دارند (لی و همکاران، ۲۰۱۵). زنگ و همکاران (۲۰۱۵)، اثر دما بر شاخص پیرشدگی قیر به روش تابش ماوراء بنفش را مورد بررسی قرار دادند. جهت بررسی اثر دما، سه دمای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس انتخاب شده بود. نتایج نشان داد که تأثیر دما بر پیرشدگی UV را می‌توان در دمای ۵۰ درجه سلسیوس نادیده گرفت. ولی زمانی که دما به حدود ۷۰ درجه سلسیوس می‌رسد، اثر متقابل دما و پیرشدگی UV سبب افزایش نرخ اکسیداسیون و تبخیر مواد فرار قیر می‌شود. با توجه به شرایط این مطالعه، به منظور کمینه کردن تأثیر دما بر پیرشدگی UV، دمای ۵۰ درجه سلسیوس پیشنهاد شده است. ما و همکاران (۲۰۱۱)، تأثیر رطوبت بر مکانیزم پیرشدگی قیر در طول عمر سرویس‌دهی روسازی را توسط آزمون‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی

ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌ها در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت انجام گرفته است (جنکس و همکاران، ۲۰۱۱).

نرم افزار آزمون خزش دینامیک با روش‌ها و استانداردهای آزمون‌های بین‌المللی British: DD226 مطابقت می‌کند. مهمترین هدف آزمایش خزش، مطالعه عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارافتادگی است. مهمترین پارامتر به دست آمده از آزمایش خزش، کرنش تجمعی است که به نوعی بستگی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی دارد. نکته مهم در مورد این آزمایش این است که از مقادیر تغییر مکان تجمعی حاصل نمی‌توان به عنوان عمق شیار استناد کرد و در واقع این آزمایش برای مقایسه بین انواع مختلف نمونه آسفالتی کاربرد دارد. دلیل این امر این است که مخلوط آسفالتی از شرایط مهار جانبی که در حالت واقعیت از آن برخوردار است، بهره نمی‌برد و بنابراین تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد. تعداد و جزئیات آزمایش‌های دینامیک انجام شده در جدول ۱ ارائه گردیده است.

از دو نوع مصالح سنگی آهکی و سیلیسی استفاده گردید. جهت تعیین قیر بهینه، از روش مارشال، مطابق استاندارد ASTM D1559، استفاده گردیده است. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق لازم است تا نمونه‌های آسفالتی جهت انجام آزمایش خزش دینامیک ابتدا مورد پیرشدگی قرار گیرند. مطابق SHRP، روش پیرکردن کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی تحت عنوان استاندارد AASHTO R30 برای شبیه‌سازی پیرشدگی مخلوط‌های HMA آورده شده است. مطابق این استاندارد، جهت شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت، مخلوط غیرمتراکم در ضخامت بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر درون یک پَن پهن شده و به مدت $4hr \pm 5min$ در یک محفظه با دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت نیز ابتدا نمونه‌های غیرمتراکمی که در مرحله قبلی پیر شده بودند، بلافاصله متراکم شده و در همان آون، ولی با دمایی معادل ۸۵ درجه سلسیوس و برای مدت ۱۲۰ ساعت جای‌گذاری می‌شوند. از آنجایی که شیارشدگی در اوایل عمر روسازی به وجود می‌آید، آزمایش‌های عملکردی جهت

جدول ۱. تعداد و نوع آزمایش‌های خزش دینامیک انجام شده

| سطوح تنش اعمالی | سطوح دمای آزمایش | تکرار ساخت جهت ملاحظات خطا | نوع مصالح سنگی | سن نمونه | مجموع نمونه‌های ساخته شده |
|-----------------|------------------|----------------------------|----------------|----------|---------------------------|
| ۱۰۰ KPa | ۵۰°C | ۳ نمونه | سیلیسی | اولیه | ۴۸ |
| ۳۰۰ KPa | ۶۰°C | ۳ نمونه | آهکی | ثانویه | ۴۸ |

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل نتایج آزمایش‌های مارشال

نتایج آزمایش‌های مارشال جهت تعیین محدوده قیر بهینه در نمونه‌های آهکی و سیلیسی با نوع دانه‌بندی توپکا در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های مارشال جهت تعیین محدوده قیر بهینه در نمونه‌های آهکی

| VFA (%) | VMA (%) | Void (%) | Unit Weight (gr/cm ³) | Flow (mm) | Stability (N) | قیر (%) |
|---------|---------|----------|-----------------------------------|-----------|---------------|---------|
| ۶۶/۲۲ | ۱۴/۲۷ | ۴/۸۲ | ۲/۳۳۱ | ۲/۵۵ | ۱۲۳۰ | ۵ |
| ۶۵/۲۸ | ۱۴/۳۴ | ۴/۹۸ | ۲/۳۲۹ | ۲/۶۵ | ۱۲۱۲ | ۵ |
| ۶۹/۶۶ | ۱۴/۱۷ | ۴/۳۰ | ۲/۳۴۶ | ۲/۸۱ | ۱۳۰۰ | ۵/۵ |
| ۶۹/۰۴ | ۱۴/۵۴ | ۴/۵۰ | ۲/۳۳۶ | ۲/۹۹ | ۱۲۷۶ | ۵/۵ |
| ۷۲/۴۵ | ۱۴/۸۴ | ۴/۰۹ | ۲/۳۴۰ | ۲/۹۸ | ۱۲۷۸ | ۶ |
| ۷۲/۸۴ | ۱۵/۱۰ | ۴/۱۰ | ۲/۳۳۳ | ۳/۱ | ۱۲۶۵ | ۶ |
| ۷۶/۸۷ | ۱۶/۶۰ | ۳/۸۴ | ۲/۳۰۴ | ۳/۴ | ۱۱۹۲ | ۶/۵ |
| ۷۶/۷۴ | ۱۶/۱۶ | ۳/۷۶ | ۲/۳۱۶ | ۳/۲ | ۱۲۲۶ | ۶/۵ |

بیشتری با قیر و به تبع آن با مصالح سنگی دیگر پیدا می‌کند، لذا در قیاس با مصالح سیلیسی که دارای ذرات صیقلی بوده و چسبندگی ضعیف‌تری نیز با قیر دارند، از میزان روانی بیشتری برخوردارند. جدول ۴ مقدار قیر بهینه در نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰ را نشان می‌دهد.

در اینجا وجود مصالح آهکی به دلیل زبری ذرات و خاصیت جذب قیر موجب استقامت بیشتر نمونه‌های بتن آسفالتی با قیر ۶۰-۷۰ در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی می‌گردد. جذب قیر کم توسط دانه‌های صیقلی سیلیس، موجب کاهش روانی نمونه‌ها می‌گردد. با توجه به این مهم که ذرات آهکی به دلیل زبری و خاصیت جذب قیر بیشتر، چسبندگی

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های مارشال جهت تعیین محدوده قیر بهینه در نمونه‌های سیلیسی

| VFA (%) | VMA (%) | Void (%) | Unit Weight (gr/cm ³) | Flow (mm) | Stability (N) | قیر (%) |
|---------|---------|----------|-----------------------------------|-----------|---------------|---------|
| ۵۸/۴۰ | ۱۵/۱۲ | ۶/۲۹ | ۲/۲۷۵ | ۲/۲۶ | ۸۲۳ | ۴ |
| ۵۹/۱۸ | ۱۴/۸۷ | ۶/۱۱ | ۲/۲۷۹ | ۱/۹۴ | ۸۵۷ | ۴ |
| ۶۳/۷۹ | ۱۴/۰۰ | ۵/۰۷ | ۲/۳۱۷ | ۲/۱۸ | ۹۹۱ | ۴/۵ |
| ۶۳/۱۱ | ۱۴/۴۵ | ۵/۳۳ | ۲/۳۰۵ | ۲/۴۲ | ۹۶۳ | ۴/۵ |
| ۶۶/۸۲ | ۱۳/۷۱ | ۴/۵۵ | ۲/۳۳۷ | ۲/۶۳ | ۱۰۸۷ | ۵ |
| ۶۶/۲۷ | ۱۴/۳۸ | ۴/۸۵ | ۲/۳۱۹ | ۲/۷۷ | ۱۰۶۱ | ۵ |
| ۷۴/۰۷ | ۱۵/۲۷ | ۳/۹۶ | ۲/۳۰۷ | ۳/۵۸ | ۱۰۰۳ | ۵/۵ |
| ۷۵/۲۱ | ۱۴/۶۸ | ۳/۶۴ | ۲/۳۲۳ | ۳/۲۲ | ۱۰۲۷ | ۵/۵ |

جدول ۴- مقدار قیر بهینه در نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰

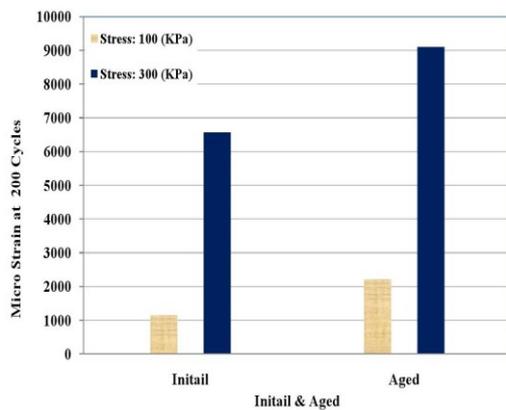
| ردیف | نوع قیر | نوع مصالح | درصد قیر بهینه |
|------|---------|-----------|----------------|
| ۱ | ۶۰-۷۰ | آهکی | ۵/۵ |
| ۲ | ۶۰-۷۰ | سیلیسی | ۵ |

آهکی در نمونه‌های پیر شده می‌باشد. همچنین، دیده می‌شود که تأثیر توأم افزایش تنش و سن پیرشدگی موجب افزایش چشمگیر تغییرشکل‌ها در نمونه بتن آسفالتی می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، قیرها در اثر گذشت زمان دچار اکسیداسیون شده، که این روند موجب افزایش تغییرشکل‌ها در قیر می‌شود.

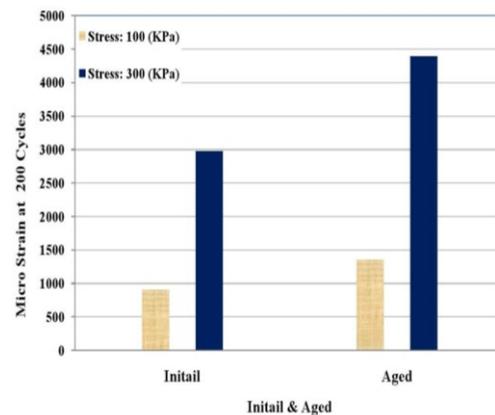
هیستوگرام‌های شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات در میزان کرنش نمونه‌های آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۷۰-۶۰-۶۰ به ترتیب در تنش‌ها و دماهای متفاوت را نشان می‌دهند.

۳-۲. نتایج آزمون خزش دینامیک

هیستوگرام‌های شکل‌های ۱ و ۲ تغییرات در میزان کرنش نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و قیر ۷۰-۶۰ به ترتیب در تنش‌ها و دماهای متفاوت را نشان می‌دهند. در شکل‌های ۱ و ۲، تغییرات در میزان کرنش نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و قیر ۷۰-۶۰ در اثر افزایش سن پیرشدگی نمایش داده شده است. در یک سیکل ثابت، تغییرات کرنش ناشی از اعمال تنش در سنین اولیه به مراتب کمتر از تغییرشکل‌های نمونه بتن آسفالتی با مصالح



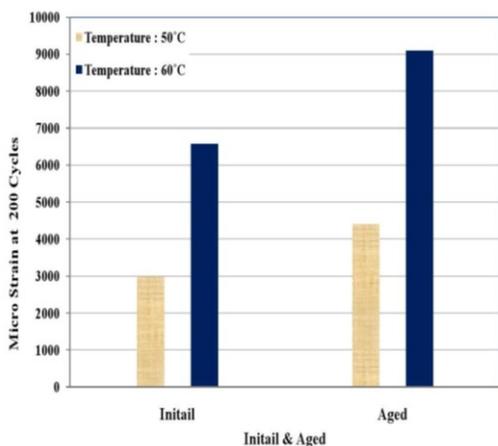
(ب)



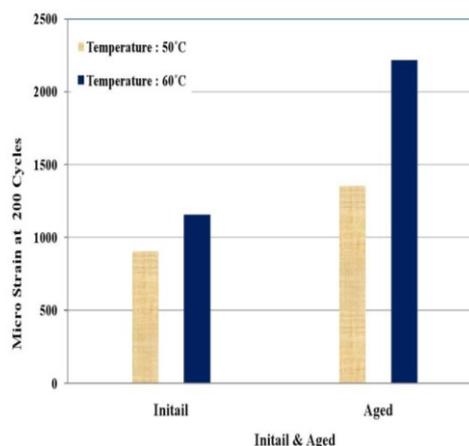
(الف)

شکل ۱. تغییرات کرنش در سیکل ۲۰۰ نسبت به سن نمونه در تنش‌های متفاوت (نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و قیر

۶۰-۷۰): الف) دمای ۵۰ °C و ب) دمای ۶۰ °C

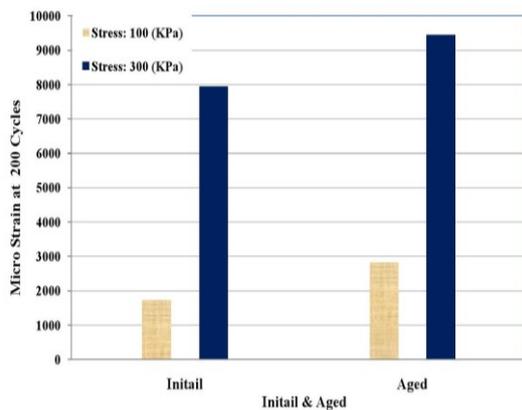


(ب)

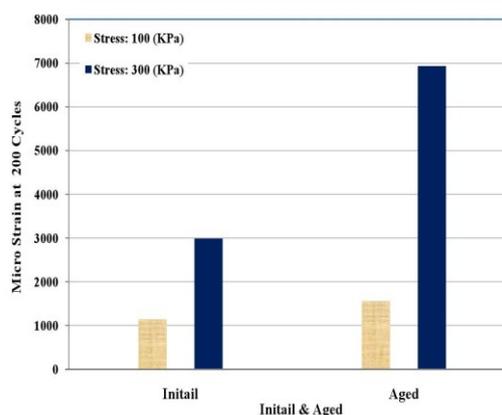


(الف)

شکل ۲. تغییرات کرنش در سیکل ۲۰۰ نسبت به سن نمونه در دماهای متفاوت (نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و قیر ۷۰-۶۰): (الف) تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و (ب) تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال



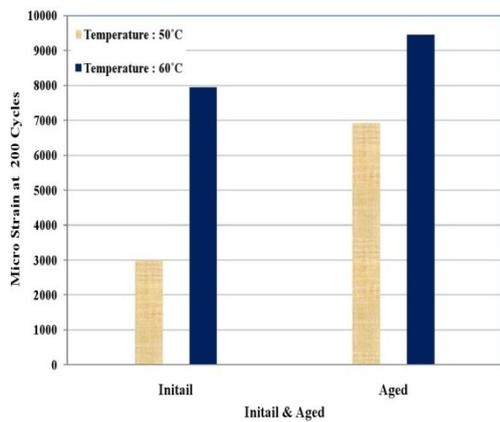
(ب)



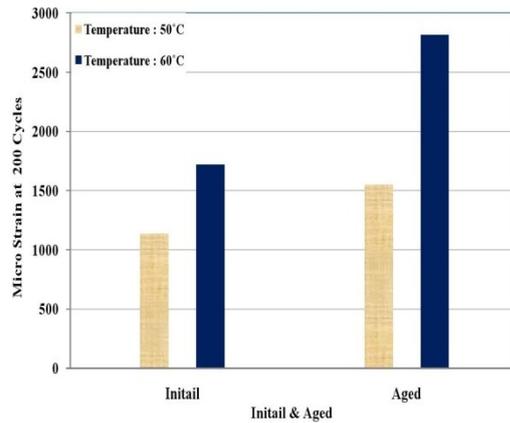
(الف)

شکل ۳. تغییرات کرنش در سیکل ۲۰۰ نسبت به سن نمونه در تنش‌های متفاوت (نمونه‌های آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۷۰-۶۰): (الف) دمای ۵۰ °C و (ب) دمای ۶۰ °C

ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خزشی بتن آسفالتی پیر شده با لحاظ تأثیر جنس مصالح سنگی



(ب)



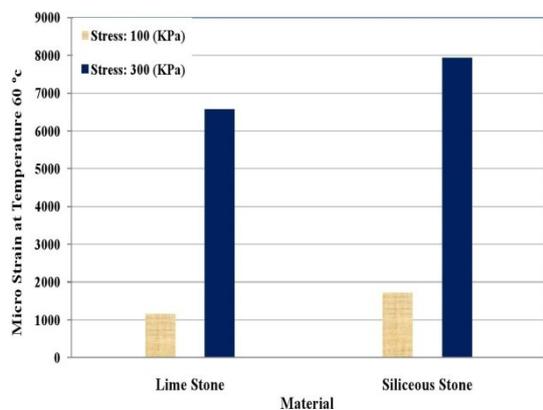
(الف)

شکل ۴. تغییرات کرنش در سیکل ۲۰۰ نسبت به سن نمونه در دماهای متفاوت (نمونه‌های آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰): (الف) تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و (ب) تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال

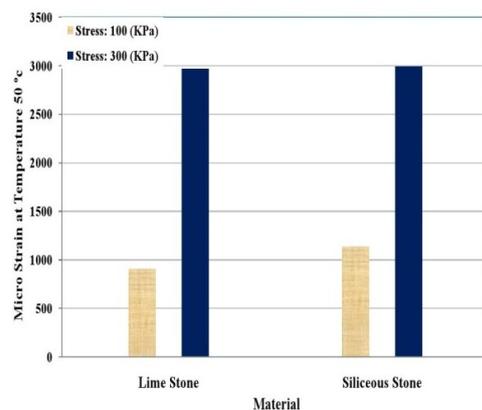
پیرشدگی موجب افزایش چشمگیر تغییرشکل‌ها در نمونه بتن آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰ می‌شود. می‌توان گفت که اکسیداسیون قیرها در اثر گذشت زمان، موجب افزایش تغییرشکل‌ها در قیر می‌شود.

شکل ۵ مربوط به تغییرات کرنش در سنین اولیه نسبت به مصالح سیلیسی و آهکی در نمونه‌های آسفالتی با قیر ۶۰-۷۰ می‌باشد.

همانگونه که در شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌گردد، میزان کرنش نمونه‌های آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰ در اثر پیرشدگی نمایش داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در یک سیکل ثابت تغییرات کرنش ناشی از اعمال تنش در نمونه‌های اولیه به مراتب کمتر از تغییرشکل‌های نمونه بتن آسفالتی با مصالح سیلیسی در نمونه‌های پیر شده می‌باشد. همچنین، دیده می‌شود که تأثیر توأم افزایش تنش و



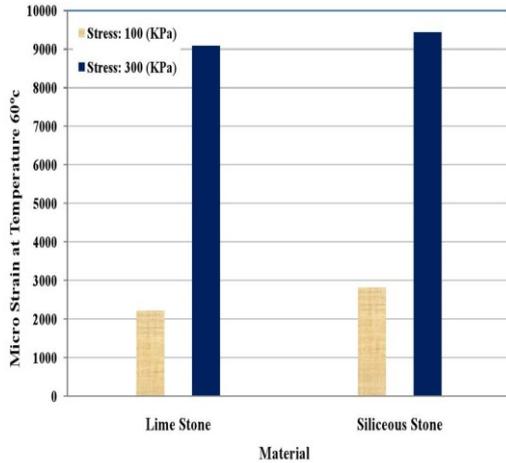
(ب)



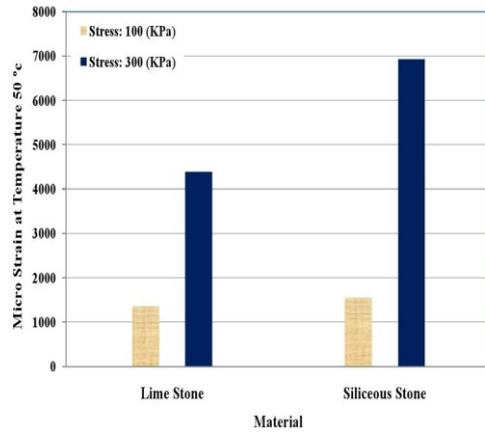
(الف)

شکل ۵. تغییرات کرنش نسبت به تغییر مصالح برای نمونه‌های اولیه (نمونه‌های آسفالتی با قیر ۶۰-۷۰): (الف) دمای ۵۰ °C و (ب) دمای ۶۰ °C

شکل ۶ مربوط به تغییرات کرنش در سن پیرشدگی نسبت به مصالح سیلیسی و آهکی در نمونه‌های آسفالتی با قیر ۷۰-۶۰ می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۶. تغییرات کرنش نسبت به تغییر مصالح برای نمونه‌های پیر شده (نمونه‌های آسفالتی با قیر ۷۰-۶۰): (الف) دمای ۵۰ °C و (ب) دمای ۶۰ °C

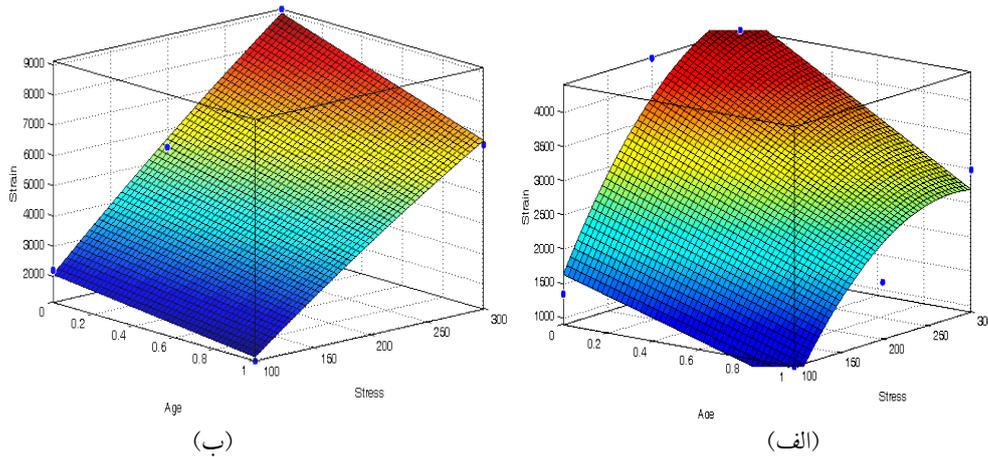
دمای ثابت در مصالح سیلیسی قریب به ۶ برابر مصالح آهکی می‌باشد.

۳-۳. مدل‌های تخمین قابلیت خزشی

رفتار خزشی بتن آسفالتی با لحاظ تأثیر همزمان پیرشدگی و تنش اعمالی با قیر (۷۰-۶۰) و مصالح آهکی) به همراه خروجی محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار Matlab در شکل ۷ نشان داده شده است. (الف) مربوط به دمای ۵۰ و شکل (ب) مربوط به دمای ۶۰ درجه می‌باشد:

مصالح آهکی، به سبب دارا بودن خصوصیتی نظیر سختی زیاد، قادر خواهند بود با ایجاد تغییرات اندکی در مشخصه‌های قیر مصرفی، مقاومت خزشی روسازی‌های آسفالتی را به سبب اصلاح قیر بهبود بخشند. از دیگر مشخصه‌های مصالح آهکی می‌توان به اثر آهک در بهبود کیفیت قیر اشاره نمود. نمونه‌های آهکی، سطحی آهکی و زبر دارند. بنابراین، مقاومتشان بالاست. نمونه‌های سیلیسی، به دلیل داشتن سطح صاف و صیقلی، روی هم می‌لغزند. بنابراین، چسبندگی بین قیر و مصالح کم شده، خود باعث کاهش مقاومت و افزایش تغییرشکل‌ها می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرشکل ناشی از تغییر جنس مصالح در

ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خزشی بتن آسفالتی پیر شده با لحاظ تأثیر جنس مصالح سنگی

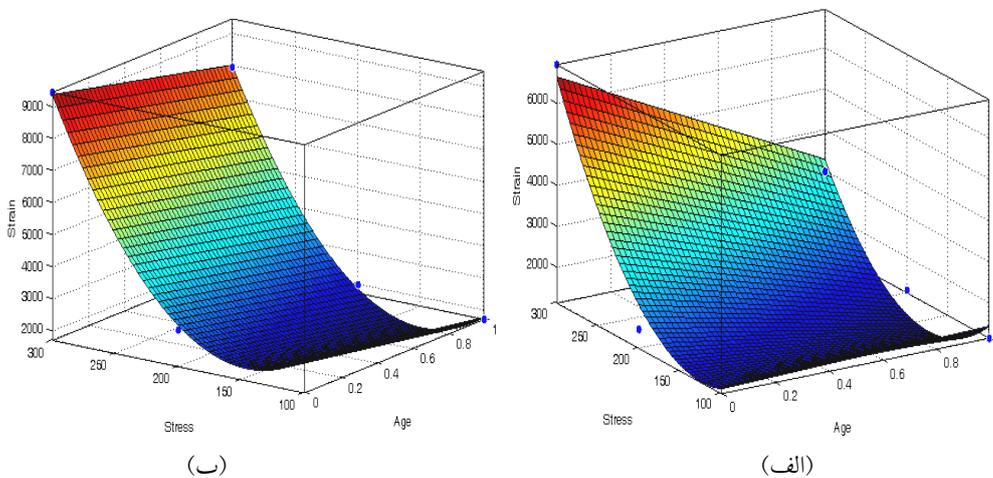


شکل ۷. مدل سه بُعدی رفتار خزشی بتن آسفالتی با لحاظ تأثیر همزمان پیرشدگی و تنش اعمالی در نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی: الف) دمای ۵۰ °C و ب) دمای ۶۰ °C

قیر ۶۰-۷۰ می‌شود. همان طور که اشاره گردید، قیرها در اثر گذشت زمان دچار اکسیداسیون شده که این روند موجب افزایش تغییرشکل‌ها در قیر می‌شود. همچنین، با مقایسه دو مدل فوق می‌توان نتیجه گرفت که میزان تغییرشکل‌های ناشی از پیرشدگی در دمای بالاتر، بیشتر است.

رفتار خزشی بتن آسفالتی با لحاظ تأثیر همزمان پیرشدگی و تنش اعمالی (با قیر ۶۰-۷۰ و مصالح سیلیسی) به همراه خروجی محاسبات انجام شده توسط نرم افزار Matlab در شکل ۸ نشان داده شده است.

مدل استخراج شده از نرم افزار Matlab مطابق شکل ۷ برای نمایش تغییرات در میزان کرنش نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و قیر ۶۰-۷۰ در اثر افزایش سن پیرشدگی ارائه شده است. همان طور که گفته شد، در یک سیکل ثابت، تغییرات کرنش ناشی از اعمال تنش در سنین اولیه به مراتب کمتر از تغییرشکل‌های نمونه بتن آسفالتی با مصالح آهکی در نمونه‌های پیر شده می‌باشد. همچنین، دیده می‌شود که تأثیر توأم افزایش تنش و سن پیرشدگی موجب افزایش چشمگیر تغییرشکل‌ها در نمونه بتن آسفالتی با مصالح آهکی و



شکل ۸. مدل سه بُعدی رفتار خزشی بتن آسفالتی با لحاظ تأثیر همزمان پیرشدگی و تنش اعمالی در نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی: الف) دمای ۵۰ °C و ب) دمای ۶۰ °C

۴. نتیجه‌گیری

- نمونه‌های سیلیسی، به دلیل داشتن سطح صاف و صیقلی، روی هم می‌لغزند. بنابراین، چسبندگی بین قیر و مصالح کم شده و باعث کاهش مقاومت و افزایش تغییرشکل‌ها می‌گردد.

- مصالح آهکی، به سبب دارا بودن خصوصیات نظیر سختی زیاد، قادر خواهند بود با ایجاد تغییرات اندکی در مشخصه‌های قیر مصرفی، مقاومت خزشی روسازی‌های آسفالتی را به سبب اصلاح قیر بهبود بخشند. از دیگر مشخصه‌های مصالح آهکی می‌توان به اثر آهک در بهبود کیفیت قیر اشاره نمود.

- نمونه‌های آهکی، سطحی آهکی و زبر دارند. بنابراین، مقاومتشان بالاست. نمونه‌های سیلیسی، به دلیل داشتن سطح صاف و صیقلی، روی هم می‌لغزند. بنابراین چسبندگی بین قیر و مصالح کم می‌شود.

- تأثیر توأم افزایش تنش و پیرشدگی موجب افزایش چشمگیر تغییرشکل‌ها در نمونه بتن آسفالتی با مصالح آهکی و قیر ۶۰-۷۰ می‌شود.

در مدل سه‌بُعدی شکل ۸، همان‌طور که برای مدل قبل گفته شد، میزان تغییرات در کرنش نمونه‌های آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰ در اثر پیرشدگی نمایش داده شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در یک سیکل ثابت، تغییرات کرنش ناشی از اعمال تنش در نمونه‌های اولیه به مراتب کمتر از تغییرشکل‌های نمونه بتن آسفالتی با مصالح سیلیسی در نمونه‌های پیر شده می‌باشد. همچنین، دیده می‌شود که تأثیر توأم افزایش تنش و پیرشدگی موجب افزایش چشمگیر تغییرشکل‌ها در نمونه بتن آسفالتی با مصالح سیلیسی و قیر ۶۰-۷۰ می‌شود. می‌توان گفت که اکسیداسیون قیرها در اثر گذشت زمان موجب افزایش تغییرشکل‌ها در قیر می‌شود. با بررسی مدل‌های الف و ب شکل ۸، می‌توان گفت که میزان تغییرشکل‌ها در اثر پیرشدگی توأم با اعمال تنش در نمونه‌های بتن آسفالتی با مصالح سیلیسی همانند مصالح آهکی در دمای بیشتر افزایش می‌یابد.

۵. مراجع

- آئین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران. ۱۳۹۰. نشریه ۲۳۴، تجدید نظر اول.
- رضوی نیا، س. ۱۳۹۱. "ارزیابی خصوصیات دینامیک مخلوط های آسفالتی گرم حاوی پشم فلز". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان.
- رمضانی، ف. ۱۳۹۰. "استفاده از لاستیک ضایعاتی به همراه نانورس در قیر و بررسی تأثیر آن بر ویژگی های رئولوژیکی قیر". پایان نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- سنگ سفیدی، ا. ۱۳۹۰. "رفتار خزشی و حساسیت رطوبتی آسفالت نیمه گرم". پایان نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۱- شیخ متولی، ا. ح. ۱۳۹۰. "مقایسه عملکرد مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر EVA و مخلوط های آسفالتی اصلاح نشده". پایان نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۲- عامری، م.، مقدس نژاد، ف. و میرزاحسینی، م. ر. ۱۳۸۹. "ارائه مدل پیش بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط های آسفالتی با استفاده از پارامترهای حاصل از طرح اختلاط مارشال و بررسی تأثیر این پارامترها بر عدد روانی". پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران.
- گلستانی، ب. ۱۳۸۹. "بررسی عملی تأثیر افزونه های پلیمری شاخص بر خواص قیرهای کشور با توجه به شرایط آب و هوایی ایران". پایان نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات.
- لطفی عمران، ن. "بررسی تغییر شکل های دائمی مخلوط های اصلاح شده و اصلاح نشده با قیر پلیمری و ژئوکامپوزیت تحت آزمایش خزش دینامیکی". پایان نامه کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- Al-Khateeb, G. G., Khedaywi, T. S., Obaidat, T. I. A. and Najib, A. M. 2013. "Laboratory study for comparing rutting performance of limestone and basalt superpave asphalt mixtures". *J. Mater. Civil Eng.*, 25(1): 21-29.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M. and Sasani, A. R. 2010. "The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 24: 1060-1068.
- Brown, E. R., Kandhal, P. S. and Zhang, J. 2001. "Performance testing for hot mix asphalt". NCAT Report 01-05, Auburn, AL.
- Cong, P., Chen, S., Yu, J. and Wu, S. 2010. "Effects of aging on the properties of modified asphalt binder with flame retardants". *Constr. Build. Mater.*, 24(12): 2554-2558.
- Hamza, M. O., and Omranian, S. R. 2015. "Effects of short term aging on dynamic creep properties of asphalt". *J. Teknol.*, 14: 91-97.
- Im, S. and Zhou, F. 2015. "Laboratory short-term aging protocol for plant-mixed and laboratory compacted samples." *Constr. Build. Mater.*, 89: 1-12.
- Jenks, C. W., Jencks, C. F., Harrigan, E. T., Adcock, M., Delaney, E. P. and Freer, H. 2011. "A manual for design of hot-mix asphalt with commentary". TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 673.
- Li, R., Karki, P., Hao, P. and Bhasin, A. 2015. "Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts". *Constr. Build. Mater.*, 96: 47-54.
- Ma, T., Huang, X., Mahmoud, E. and Garibaldy, E. 2011. "Effect of moisture on the aging behavior of asphalt binder". 18(4): 460-466.
- Mallick, R. B. and El-Korchi, T. 2013. "Pavement Engineering: Principles and Practices". CRC Press.
- Papagiannakis, A. T. and Masad, E. A. 2008. "Pavement Design and Materials". John Wiley & Sons, N. Y.
- Shafabakhsh, Gh. and Sajed, Y. 2014. "Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet". *Case Stud. Constr. Mater.*, 1: 96-103.
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., García-Travé, G. and Rubio-Gámez, M. C. 2015. "Laboratory study of the long-term climatic deterioration of asphalt mixtures" *Constr. Build. Mater.* 88: 32-40.
- Ma, T., Huang, X., Mahmoud, E. and Garibaldy, E. 2011. "Effect of moisture on the aging behavior of asphalt binder". 18(4): 460-466.

- Xiao, F., Amirkhanian, S. N., Karakouzian, M. and Khalili, M. 2015. "Rheology evaluations of WMA binders using ultraviolet and PAV aging procedures". *Constr. Build. Mater.*, 79: 56-64.
- Zeng, W., Wu, S., Wen, J. and Chen, Z. 2015. "The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process". *Constr. Build. Mater.*, 93: 1125-1131.

ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خزشی بتن آسفالتی پیر شده با لحاظ تأثیر جنس مصالح سنگی