

## پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

آتنا فردوسی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور تهران شمال،

تهران

محمودرضا کی منش\*، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور تهران شمال، تهران

فریدون مقدس نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران

امیر ایزدی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل

Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

### چکیده

مقاومت در برابر خستگی یکی از مهمترین خصوصیات مصالح آسفالتی می‌باشد که در طراحی روسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روسازی، با گذشت زمان، به دلیل عبور بارهای ترافیکی و فرار گرفتن در معرض شرایط مختلف محیطی، دچار خرابی می‌شود. ترک‌های ناشی از خستگی در لایه‌های آسفالتی به عنوان معیاری در روش‌های طراحی پذیرفته شده است. آزمایش‌های مختلفی برای مدل‌سازی آزمایشگاهی استفاده می‌شود که از میان آن‌ها آزمایش تیر خستگی چهارنقطه‌ای بهترین تطابق را با شرایط میدانی دارد. در این مطالعه، تأثیر افزودنی زایکوترم بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی عمر خستگی به روش انرژی تلف شده و ارتباط پارامترهای انرژی و روش سنتی (کاهش ۵۰ درصدی مدول سفتی) از دیگر اهداف این پژوهش است. در این مطالعه، از دو نوع مصالح سنگی آهکی و سیلیسی، قیر خالص ۶۰-۷۰ و افزودنی زایکوترم به مقدار ۰/۱ درصد نسبت وزنی قیر استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۰/۱ درصد زایکوترم باعث بهبود عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم شد. مخلوط‌های حاوی سنگدانه آهکی نسبت به مصالح سیلیسی عملکرد بهتری در برابر خستگی داشتند. همچنین، ارتباط بسیار خوبی میان پارامترهای انرژی و عمر خستگی به دست آمد. آزمون ANOVA فریدمن نشان داد که تفاوت معناداری بین پارامترهای تشخیص عمر خستگی ( $N_f50$ ،  $NS^*N$ ،  $NER$ ) و  $PV$  مخلوط‌های مختلف وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی نیمه گرم، خستگی، انرژی تلف شده، زایکوترم

## ۱. مقدمه

شده به آن را نشان می‌دهد. از آنجایی که مسیر بارگذاری و باربرداری در یک ماده غیرالاستیک روی هم قرار نمی‌گیرند، این فرایند بارگذاری و باربرداری همیشه شامل اتلاف انرژی خواهد بود که به این پدیده هیستریزیس می‌گویند. در یک فرایند بارگذاری و باربرداری، مساحت داخل هر حلقه هیستریزیس تنش- کرنش، مقدار انرژی تلف شده برای یک سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. پژوهشگران نشان داده‌اند که بین انرژی تلف شده‌ی تجمعی و عمر خستگی رابطه‌ای منطقی وجود دارد و می‌توان از انرژی تلف شده‌ی تجمعی برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد (کارپتر و شن، ۲۰۰۶).

مخاطرات زیست‌محیطی، گرمای جهانی، افزایش هزینه‌های مرتبط با انرژی و مسائل زیست‌محیطی سبب شده است تا صنایع مختلف دنیا تلاش‌هایی جهت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و استفاده بهینه از مصرف انرژی انجام دهند. صنعت آسفالت نیز از این قاعده مستثنی نبوده است. یکی از روش‌های مقابله با مخاطرات زیست‌محیطی استفاده از فن‌آوری آسفالت نیمه‌گرم<sup>۱</sup> به عنوان جانشینی برای مخلوط‌های آسفالتی گرم بود. این فن‌آوری از سال ۲۰۰۰ در ایالات متحده به‌کار گرفته شده است. کاهش دمای اختلاط و تراکم سبب کاهش مصرف انرژی و انتشار مقدار کمتری از گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. مطالعات گسترده‌ای روی خواص واکنش‌ها و افزودنی‌های آلی مختلف و تأثیر آنها بر عملکرد مخلوط آسفالتی انجام شده است که بسیاری از آنها از جمله ساسوبیت، اوترم، رثوفالت و زایکوترم خواص قابل قبولی از خود نشان داده‌اند (ایزدی، ۱۳۹۱).

در سال‌های اخیر، بررسی رفتار مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم با توجه به خصوصیتی که در مورد آن مطرح گردید از جوانب مختلف نظیر عمر خستگی، مقاومت در برابر شیارشدگی، نحوه گسترش ترک در دمای کم و ... مورد ارزیابی و کاوش محققان این حوزه قرار گرفته

عمده خرابی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر در اثر دو عامل ترک خوردگی یا شیارشدگی روی می‌دهد. عامل شیارشدگی در اثر عبور بارهای بیش از توان روسازی است، اما ترک‌ها معمولاً در اثر عبور زیاد وسایل نقلیه با بارهای عادی و انقباض و انبساط روسازی در اثر تغییرات دمایی حاصل می‌شوند. از میان این دو نوع خرابی، ترک‌های مربوط به خستگی بیشتر از بقیه خرابی‌ها در رویه‌های آسفالتی دیده می‌شوند. خستگی عبارت است از پدیده شکست بر اثر تکرار بار و تغییر و تناوب دینامیک بار که معمولاً کمتر از مقاومت نهایی استاتیک آسفالت می‌باشد (مدرس و آلوگر، ۲۰۱۷).

با وجود بارهای تکراری در طول دوران عمر سرویس‌دهی راه، روسازی‌های آسفالتی به علت خرابی ناشی از خستگی که با شروع ترک‌هایی نمایان می‌گردد، دچار شکست سازه‌ای می‌گردند. این خرابی یکی از اصلی‌ترین مدهای شکست در سازه روسازی محسوب می‌گردد که سبب جدا شدن مصالح و تخریب ساختاری روسازی می‌گردد. گسترش این ترک‌ها در سه مرحله انجام می‌شود. مرحله اول، مرحله آغاز ترک است که این ترک‌ها در اثر تمرکز تنش در رویه ایجاد می‌شوند. در مرحله دوم، ترک‌هایی که در مرحله اول ایجاد شده بودند شروع به گسترش می‌کنند و ترک‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شوند. در مرحله سوم، شکست روسازی اتفاق می‌افتد (هوانگ، ۲۰۰۴).

رویکردهای تحلیل خستگی شامل پدیدارشناختی، مکانیک خرابی، مکانیک شکست و انرژی تلف شده می‌باشند (معمدی، ۱۳۹۹). رویکرد مورد استفاده در این پژوهش مبتنی بر انرژی تلف شده بوده و به این صورت است که زمانی که یک ماده تحت بارگذاری خارجی قرار گرفته و نسبت به آن از خود مقاومت نشان می‌دهد، مساحت زیر منحنی تنش- کرنش آن ماده، انرژی وارد

<sup>1</sup>- Warm Mix Asphalt

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم نامیده می‌شوند. این فن-آوری، با اضافه کردن افزودنی‌های آلی و معدنی، امولسیون‌های شیمیایی یا استفاده از روش کف‌زایی با آب، ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهد و امکان تولید مخلوط قیر و سنگدانه را در دمای کمتر از مخلوط‌های آسفالتی گرم فراهم می‌کند. خستگی، یک فرایند آسیب‌تجمعی است که به عنوان اصلی‌ترین عامل ایجاد ترک خوردگی روسازی‌های آسفالتی مطرح می‌شود. با پیش‌بینی درست عمر خستگی، می‌توان به طراحی بهتر و بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی در راه‌ها دست یافت (ایزدی، ۱۳۹۱).

زایکوترم یکی از این افزودنی‌هایی می‌باشد که به طور موفقیت‌آمیزی در این زمینه باعث بهبود خصوصیات آسفالت نیمه‌گرم شده است. فخری و هاشم نژاد (۱۳۹۴)، در پژوهشی، با افزودن زایکوترم به میزان ۰/۸، ۰/۱ و ۰/۱۲ درصد وزنی قیر، دریافتند که افزودن مقدار ۰/۸ درصد از این افزودنی، با کاهش دمای قابل توجه، مقاومت خستگی را افزایش می‌دهد. زایکوترم، با سطح ویژه بالایی که دارد، باعث افزایش خاصیت چسبندگی قیر و بهبود قفل و بست سنگدانه‌ها به یکدیگر گشته و باعث ارتقای خصوصیات مکانیکی می‌گردد (گردی و شفابخش، ۲۰۱۷).

یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای توصیف رفتار خستگی در مواد، رویکرد مبتنی بر پدیدارشناختی می‌باشد. در این روش، تنش و کرنش ناشی از تکرار سیکل بارگذاری به‌عنوان پارامتری به منظور پیش‌بینی خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش نیازمند تست‌های زیادی بود. از این رو، روش‌های جدید مورد استفاده قرار گرفت عنیب و دیاب (۲۰۱۷). روش دیگر جهت بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم، ماکزیمم حاصل‌ضرب مدول سفتی در سیکل بارگذاری می‌باشد (عامری و همکاران، ۲۰۱۷؛ دی ال بابادوپولوس و همکاران، ۲۰۱۸). مکانیک آسیب پیوسته

است. با توجه به استفاده از افزودنی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف کاهنده ویسکوزیته در تولید آسفالت نیمه‌گرم، همچنان زوایای پنهانی در مورد تأثیر به‌کارگیری این افزودنی‌ها و اثرات آنها بر عملکرد فنی این نوع مخلوط وجود دارد که این موضوع محققان را بر آن داشته تا از روش‌های مختلف ارزیابی برای بررسی مکانیسم تأثیرگذاری افزودنی‌ها بر عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم استفاده نمایند.

مواردی نظیر دمای تولید و پخش پایین‌تر، پیرشدگی کمتر قیر در طول فرایند تولید و اجرا، مصرف کمتر سوخت و در نتیجه کاهش هزینه تولید، کاهش پخش آلاینده‌های کارخانه‌های آسفالت در طول اجرای آسفالت و کاهش تولید گرد و غبار در مرحله تولید، مقرون به صرفه بودن استفاده از تکنولوژی نیمه‌گرم را توجیه می‌نماید (گانندی، ۲۰۰۸).

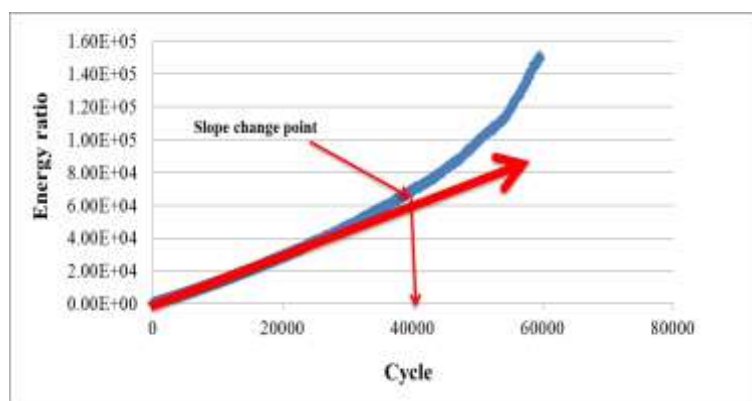
هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم با سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی حاوی افزودنی زایکوترم می‌باشد. ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم حاوی زایکوترم به روش‌های مختلف رویکرد پدیدارشناختی و انرژی تلف شده به همراه بررسی پارامترهای مختلف انرژی تلف شده نظیر PV، RDEC، IDE و CDE از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

## ۲. مروری بر ادبیات

آسفالت نیمه‌گرم با استفاده از برخی افزودنی‌های کاهنده ویسکوزیته، دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی گرم را کاهش می‌دهد. کاهش در مصرف انرژی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، فن‌آوری آسفالت نیمه‌گرم را به یکی از موضوعات مورد علاقه در صنعت آسفالت تبدیل کرده است. به طور کلی، فن‌آوری‌هایی که در آن‌ها مخلوط‌های آسفالتی در دمایی نسبتاً کمتر از مخلوط‌های آسفالتی گرم متداول تولید و اجرا می‌شوند به عنوان

تشکیل شدن این ترک‌های به نسبت بزرگ با هم متمایز است (معمدی، ۱۳۹۹).

اتلاف انرژی، به‌عنوان یک پارامتر قابل قبول برای ارزیابی خصوصیات خستگی مواد می‌باشد. در شکل ۱، خرابی خستگی در نقطه‌ای رخ می‌دهد که شیب نمودار نسبت انرژی به سیکل، نسبت به خط تانژانت منحرف می‌شود. در شکل ۱، این نقطه به‌عنوان نقطه تغییر شیب قابل رؤیت می‌باشد. تعیین این نقطه نیاز به قضاوت مهندسی و روش برازش منحنی دارد (مدرس و آلوگر، ۲۰۱۷).



شکل ۱. نمونه‌ای از نتایج نمودار ER به سیکل بارگذاری و نحوه به‌دست آوردن NER (مدرس و آلوگر، ۲۰۱۷)

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ارتباط بین عمر خستگی و انرژی تلف شده تجمعی تحت تأثیر شرایط آزمایش مانند حالت بارگذاری، فرکانس بارگذاری، دوره استراحت و دمای آزمایش قرار نمی‌گیرد. با این حال، این پارامتر به شدت وابسته به نوع مواد و نوع اختلاط است (شن و همکاران، ۲۰۰۶؛ مدرس و آلوگر، ۲۰۱۷؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، تعریف بهتری از مفهوم انرژی تلف شده برای تجزیه و تحلیل خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم ارائه شده است که در آن از نسبت انرژی تلف شده برای ارزیابی مقاومت خستگی استفاده شده است (شن و کارپنتر، ۲۰۰۶).

تاکنون در نتایج مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، تأثیر به‌کارگیری افزودنی زایکوترم بر عملکرد خستگی نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم، بدون در نظر گرفتن جزییات ارتباط بین پارامترهای انرژی و عمر خستگی

به‌عنوان یکی از شاخه‌های نوپا در علم مکانیک محسوب می‌شود. تمامی مواد دارای نقص‌هایی به صورت ترک، حفره و عیوب دیگر می‌باشند. مخلوط‌های آسفالتی نیز دارای مقداری حفره هوا هستند (۳ تا ۵ درصد) که بر حسب تحلیل مکانیزم شکست ممکن است به‌عنوان نقص از پیش موجود در ماده قلمداد شده و باعث افزایش میزان تنش شوند. در دماهای کم، مکانیزم خرابی شکست حاکم بوده که با شیوع ترک‌های ریز، ترک‌های بزرگ تشکیل می‌شود و مکانیزم شکست در قبل و بعد از

در مطالعات گذشته، به بررسی رابطه بین پارامترهای مختلف انرژی تلف شده و عمر خستگی پرداخته شده است که در آنها پارامترهای مبتنی بر انرژی تلف شده اولیه (IDE) پاسخ دقیق‌تری در مورد عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم نشان داده است (قوزلان و کارپنتر، ۲۰۰۰؛ کارپنتر و شن، ۲۰۰۶؛ ستاگاتا و همکاران، ۲۰۱۵). تحقیقات صورت گرفته نشان داده که می‌توان با استفاده از پارامتر IDE، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را پیش‌بینی کرد (قوزلان، ۲۰۰۱). اگرچه پارامترهای IDE و انرژی تلف شده تجمعی (CDE) شاخص‌های خوبی برای تحلیل رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم هستند، اما مطالعات انجام شده قبلی نشان داده که پارامتر IDE حساسیت زیادی نسبت به نوع مواد و شرایط آزمایش دارد (کارپنتر و شن، ۲۰۰۶؛ مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۵).

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

عمر خستگی تعیین و مدل بهبود یافته آماری بر اساس نتایج حاصل، ارائه گردید.

پژوهشگران برای تعیین عمر خستگی در مخلوط‌های آسفالتی از روش تحلیل بر اساس انرژی تلف شده استفاده کرده‌اند. ماهیت نظری و قابلیت بررسی چگونگی ایجاد خستگی در مخلوط‌های آسفالتی در حین بارگذاری، از مزایای روش انرژی تلف شده محسوب می‌شود. با گسترش استفاده از این روش، معیارهای مختلفی مانند "نسبت انرژی"، "نسبت کاهش انرژی" و "نسبت تغییر انرژی تلف شده" برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده است. پژوهشگران نشان داده‌اند که بین انرژی تلف شده‌ی تجمعی و عمر خستگی رابطه‌ای منطقی وجود دارد و می‌توان از انرژی تلف شده‌ی تجمعی برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد (عامری و همکاران، ۲۰۱۷؛ دی ال بابدو پولوس و همکاران، ۲۰۱۸).

در این تحقیق، جهت بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم از سه معیار کاهش ۵۰ درصدی مدول سفتی اولیه ( $N_{f50}$ )، ماکزیمم حاصل ضرب مدول سفتی در سیکل بارگذاری ( $N_S * N$ ) و همچنین معیار نسبت انرژی که مطابق با رابطه (۱) می‌باشد، استفاده شده است (عامری و همکاران، ۲۰۱۷؛ دی ال بابدو پولوس و همکاران، ۲۰۱۸).

$$\frac{N_{ER}}{W_n} = \frac{n * W_1}{W_n} \quad (1)$$

که در آن  $n$  سیکل مورد نظر،  $W_1$  انرژی تلف شده اولیه و  $W_n$  انرژی تلف شده در سیکل  $n$  ام می‌باشد. در تست کرنش ثابت، با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، انرژی تلف شده در هر چرخه کاهش می‌یابد. یکی از مهمترین پارامترهای انرژی تلف شده، انرژی تلف شده تجمعی می‌باشد که در رابطه (۲) ارائه شده است (فرناندس و همکاران، ۲۰۱۳).

بررسی شده است. لذا، در این تحقیق، پس از بررسی مبسوط فاکتورهای انرژی شامل انرژی تلف شده، انرژی تلف شده تجمعی، پارامتر RDEC و پارامتر PV، ارتباط این پارامترها با عمر خستگی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. یکی از مهمترین نتایج این تحقیق که حائز اهمیت می‌باشد، پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از انرژی تلف شده اولیه می‌باشد که در واقع می‌توان تنها در مدت زمانی ۵۰ سیکل اول آزمایش، پارامتر را تعیین نمود و این نتیجه باعث کاهش زمان و هزینه انجام آزمایش‌ها، به‌خصوص آزمایش‌های خستگی مخلوط‌های آسفالتی که بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند، می‌گردد.

اهداف مشخصه این تحقیق شامل اهداف اصلی و فرعی به شرح زیر می‌باشند:

اهداف اصلی: بهبود عمر خستگی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم  
اهداف فرعی: بررسی پارامترهای انرژی تلف شده و مشخص نمودن ارتباط بین پارامترهای رویکرد پدیدارشناختی با پارامترهای انرژی.

### ۳. روش تحقیق

شروع انجام مطالعات در این تحقیق با گردآوری مستندات علمی از کتاب‌ها و مجله‌های معتبر مرتبط با حوزه راه و دسته‌بندی و انتخاب مطالب در حوزه خستگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم می‌باشد. پس از جمع‌بندی مطالعات و شناخت کاستی‌ها در روش‌های ارزیابی رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم، اقدام به ساخت نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با ماده افزودنی زایکوترم برای انجام آزمایش خستگی، مارشال و حساسیت رطوبتی با مصالح سنگی آهکی، سیلیسی و قیر گردید. نتایج حاصل از انجام تست‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و فاکتورهای اثرگذار بر

۲۰۰۶؛ شن و همکاران، ۲۰۰۶). در نهایت، پس از پالایش ضرایب، فرمول RDEC به صورت معادله (۴) قابل ارائه می‌باشد (شن و کارپنتر، ۲۰۰۶).

$$RDECa = \frac{1 - (1 + \frac{100}{a})^K}{100} \quad (4)$$

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده،  $PV$  مقدار RDEC متناظر با سیکل بارگذاری  $N_{f50}$  می‌باشد که به عنوان متغیر اساسی در پیش‌بینی عمر خستگی محسوب می‌شود و از معادله (۵) تعیین می‌گردد (اکبری و مدرس، ۲۰۱۸).

$$PV = \frac{1 - (1 + \frac{100}{N_{f50}})^K}{100} \quad (5)$$

که  $K$ ، توان عبارت انرژی تلف شده به سیکل می‌باشد.

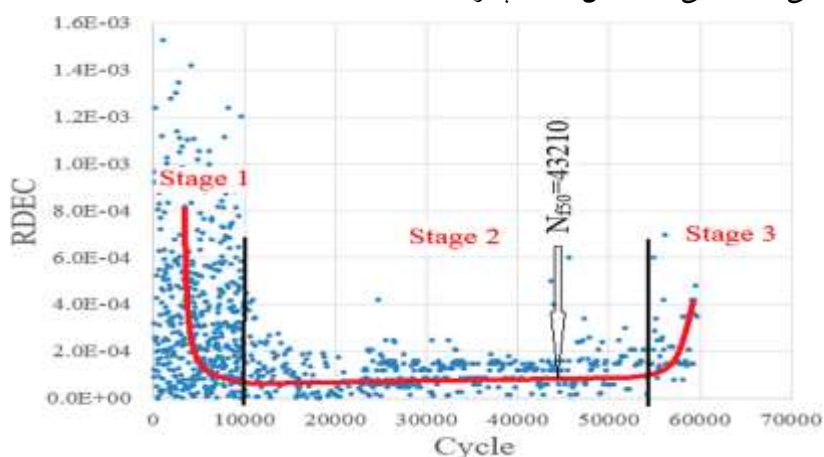
$$CDE = \sum_{i=1}^n DE_i \quad (2)$$

که در آن انرژی تلف شده تجمعی و  $DE_i$  انرژی تلف شده در سیکل  $i$  ام می‌باشد. پارامتر تغییر انرژی تلف شده از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (3)$$

که RDEC نسبت تغییرات انرژی تلف شده در هر سیکل،  $DE_n$  انرژی تلف شده در سیکل  $n$  و  $DE_{n+1}$  انرژی تلف شده در سیکل  $n+1$  است.

منحنی RDEC در شکل ۲ نشان داده شده است که بیانگر سه منطقه مجزا در این منحنی می‌باشد. منحنی خرابی، بعد از دوره اولیه، یک خط تقریباً مسطح ایجاد می‌کند. این مرحله (یعنی مرحله ۲) نشانگر شرایطی است که با انرژی ورودی تقریباً ثابت، خرابی وسیعی اتفاق می‌افتد (شن و کارپنتر،



شکل ۲. تعیین مقدار  $PV$  با استفاده از RDEC متناظر با سیکل بارگذاری  $N_{f50}$

در این پژوهش، از مصالح آهکی و سیلیسی به دلیل کاربرد وسیع آنها در مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید. مصالح سنگی سیلیسی از کارخانه آسفالت چالدران واقع در جاده هراز و مصالح سنگی آهکی از کارخانه آسفالت بلده واقع در جاده آمل به بلده تهیه گردید. درصد وزنی رد شده از الک‌های مورد نظر به شرح جدول ۱ است.

یکی دیگر از وجوه قابل تأمل و بررسی در مورد مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم، بحث حساسیت رطوبتی این مخلوط با گذشت عمر روسازی می‌باشد که در این تحقیق بر اساس استاندارد ASHTO T283، به این مقوله مهم نیز پرداخته شده است.

#### ۴. مواد و مصالح

##### ۴-۱. مشخصات دانه‌بندی و مصالح مصرفی

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

جدول ۱. دانه بندی پیوسته مخلوط آسفالتی ✓

اندازه الک	#۲۰۰	#۵۰	#۸	#۴	۳/۸"	۱/۲"	۳/۴"	۱"
درصد عبوری	۶	۱۳	۴۳	۵۹	-	۹۵	۱۰۰	-

۲-۴. مشخصات قیر و زایکوترم  
 اساس پژوهش‌های پیشین و پیشنهاد شرکت سازنده، ۰/۱ درصد وزنی قیر انتخاب گردید (ایازی و همکاران، ۲۰۱۷؛ عامری و همکاران، ۱۳۹۸). مشخصات قیر و افزودنی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آمده است.

در این پژوهش، از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ شرکت نفت پاسارگاد استفاده شد. میزان بهینه زایکوترم در قیر بر

جدول ۲. مشخصات فنی قیر ۶۰-۷۰ پاسارگاد

مقدار	آزمایش
۱۰۱۰-۱۰۶۰	جرم مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس ( $kg/m^3$ )
۷۰-۶۰	نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس ( $mm/10$ )
۵۶-۴۹	نقطه نرم شدگی ( $^{\circ}C$ )
حداقل ۱۰۰	شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (Cm)
حداکثر ۰/۲	کم کردن وزن ناشی از حرارت (%wt)
حداکثر ۲۰	میزان نفوذ پس از حرارت (%)
حداقل ۲۳۲	نقطه اشتعال ( $^{\circ}C$ )
حداقل ۹۹,۰	قابلیت حل در تری کلرواتیلن (%wt)
منفی	آزمایش نوری
۲۰۰۰	ویسکوزیته در دمای ۶۰ درجه سلسیوس (P)
حداقل ۳۰۰	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس (cSt)
حداکثر ۲	محتوای موم (%)

جدول ۳. مشخصات زایکوترم مصرفی

مشخصات	عنوان
$0.97 g/cm^3$	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
مایع	نوع ماده
زرد کم رنگ	رنگ
بیش از $80^{\circ}C$	درجه اشتعال
بدون بو	سایر

۵. برنامه آزمایشگاهی و ساخت نمونه  
 توپکا) آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شد. سپس، با استفاده از نتایج مارشال، درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی با مصالح

برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی در این تحقیق از دانه بندی شماره ۴ مخصوص مخلوط‌های آسفالتی (لايه

قطره در دقیقه به قیر اضافه شد تا مخلوط همگنی به دست آید (زیاری و همکاران، ۱۳۹۸). دال‌ها با استفاده از دستگاه غلطکی ساخته و پس از تراکم به تیرچه‌هایی به ابعاد  $380 \times 60 \times 50$  میلی‌متر بریده شدند. درصد فضای خالی تمامی دال‌ها مطابق استاندارد در حدود  $4 \pm 0.5$  بودند. در شکل ۳، مراحل مختلف ساخت آمده است.

سنگی آهکی و سیلیسی به ترتیب  $4/5$  و  $4/8$  درصد به دست آمد. افزودنی نیمه‌گرم زایکوترم توسط همزن با دور کم به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط گردید. جهت اختلاط زایکوترم با قیر خالص، از یک همزن برقی با چهار پره موازی استفاده شد و سرعت آن به نحوی تنظیم گردید که در قیر با دمای  $120$  درجه سلسیوس، گردابی به عمق ۲ الی ۳ سانتی‌متر ایجاد کند. سپس، زایکوترم با یک سرنگ انسولین به آرامی با نرخ  $10$



شکل ۳. مراحل ساخت تیرچه‌های مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم ✓

میکرواسترین صورت گرفت. دستگاه خستگی خمش چهارنقطه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۴ آمده است.

کلیه آزمایش‌های تست خمش خستگی چهارنقطه‌ای مطابق با استاندارد AASHTO T321-14 در دمای  $20$  درجه سلسیوس در حالت کرنش ثابت، در فرکانس  $10$  هرتز و در سه سطح کرنش  $400$ ،  $550$  و  $700$



شکل ۴. دستگاه آزمایش خستگی

( $SGC^1$ ) مرتبط با استاندارد سوپرپیو<sup>۲</sup> استفاده شد. یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی

برای انجام آزمایش حساسیت رطوبتی مطابق با استاندارد AASHTO T283، از متراکم‌کننده‌ی ژیراتوری

<sup>2</sup>- Superpave

<sup>1</sup>- Superpave Gyrotory Compactor



پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

اشباع‌سازی، در کیسه پلاستیکی محتوی  $10 \pm 0.5$  میلی‌متر آب قرار داده می‌شوند. سپس، در فریزر در دمای  $-18$  درجه سلسیوس، حداقل به مدت ۱۶ ساعت، نگهداری می‌شوند. سپس، نمونه‌ها در حمام مارشال  $60$  درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند. در مرحله آخر عمل آوری و قبل از آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب  $25$  درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت قرار داده می‌شوند. سپس، نمونه‌های عمل‌آوری شده و نمونه‌های خشک تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار می‌گیرند. شکل ۵، مراحل عمل‌آوری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

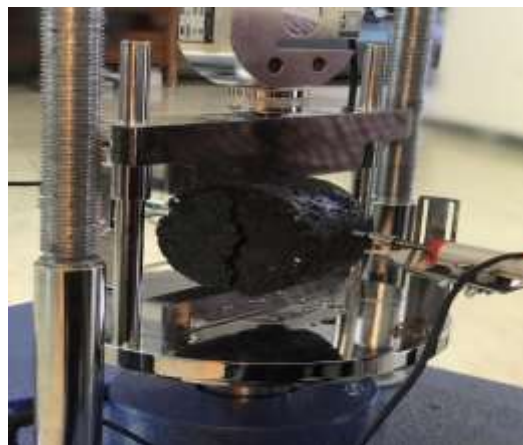


شکل ۵. مراحل عمل‌آوری نمونه‌ها جهت انجام تست حساسیت رطوبتی

بر دقیقه در دمای  $25$  درجه سلسیوس قرار گرفتند تا نمونه‌ها گسیخته شوند (شکل ۶). مقدار نیروی لازم برای گسیختگی نمونه‌ها ثبت شد.

مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش لاتمن اصلاح شده<sup>۱</sup> (کشش غیرمستقیم) است. نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای با قطر  $100$  میلی‌متر و ضخامت  $70/5$  میلی‌متر به روش سوپرپیو متراکم شدند و تعداد دوران به نحوی تنظیم گردید که درصد فضای خالی مخلوط در بازه ۶ تا ۸ درصد قرار گیرد. پس از ساخت، نمونه‌ها به دو گروه خشک و تر تقسیم می‌شوند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش در حمام آب  $25$  درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت قرار می‌گیرند. گروه دیگر از نمونه‌ها به صورت زیر عمل‌آوری می‌شوند: نمونه‌ها توسط دستگاه پمپ خلأ بین  $70$  تا  $80$  درصد اشباع می‌شوند. پس از

برای هر نوع مصالح سیلیسی و آهکی، تعداد سه نمونه به‌عنوان شاهد و سه نمونه حاوی زایکوترم تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) بین دو نوار فلزی صلب در راستای قطری نمونه‌ها با نرخ بارگذاری  $50$  میلی‌متر



شکل ۶. نمونه‌های تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS)

<sup>1</sup>- Modified Lottman test

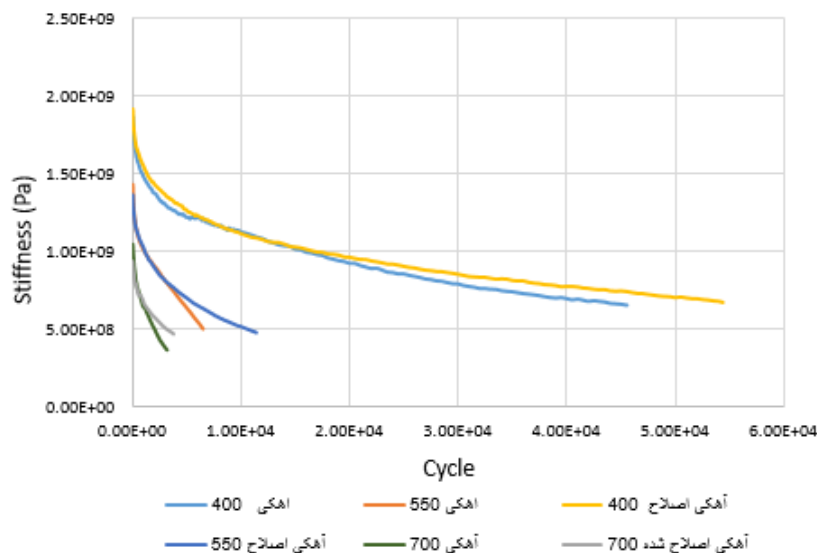
پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

## ۱-۶. نتایج تیر خستگی

۱-۱-۶. تغییرات مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۷، تغییرات مدول سفتی نسبت به سیکل‌های بارگذاری در کرنش‌های ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین برای کلیه مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم آهکی شاهد و اصلاح شده با زایکوترم با یکدیگر مقایسه گردید.

لاتمن (۱۹۷۸) بیان کرد که مخلوط‌های آسفالتی با مقدار TSR بیشتر از ۷۰٪ عموماً کمتر مستعد آسیب‌های رطوبتی هستند. حداقل نسبت مقاومت کششی قابل قبول بر اساس استاندارد آشتو T۲۳۴، بر اساس مشخصات ذکر شده در نشریه ۲۳۴، برابر ۷۵٪ در نظر گرفته شده است.

## ۶. تجزیه و تحلیل نتایج



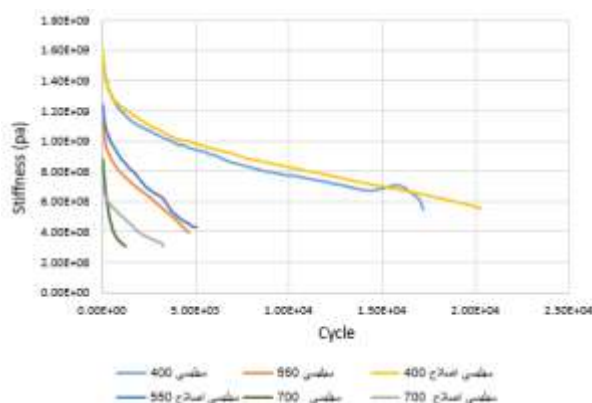
شکل ۷. مقایسه تغییرات مدول سفتی نسبت به سیکل‌های بارگذاری در کرنش‌های ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه گرم آهکی شاهد و اصلاح شده با زایکوترم

برای نمونه‌های شاهد و حاوی افزودنی تغییر نموده و مقادیر سفتی نمونه‌های حاوی افزودنی زایکوترم بیشتر از نمونه‌های شاهد است. تأثیر انجام تست در کرنش کمتر بر مقادیر سفتی و میزان سیکل نیز از روی نمودار قابل استناد است. نمودار تغییرات (افت) مقادیر سفتی در کرنش ۷۰۰ دارای شیب کاهنده زیاد در مقایسه با نتایج تست در دو سطح کرنش ۴۰۰ و ۵۵۰ می‌باشد.

در شکل ۸، تغییرات مدول سفتی نسبت به سیکل‌های بارگذاری در کرنش‌های ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین برای کلیه مخلوط آسفالتی نیمه گرم سیلیسی شاهد و اصلاح شده با زایکوترم با یکدیگر مقایسه گردید.

نتایج حاصل از تعیین مقادیر سفتی مشخص می‌نماید که مخلوط‌های آهکی شاهد و اصلاح شده در کرنش ۴۰۰ دارای مقادیر سفتی بزرگتری نسبت به دو کرنش ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین می‌باشند که بیانگر تأثیرگذاری میزان کرنش بر پاسخ مخلوط آسفالتی است. نتایج حاصل از تعیین سفتی نمونه‌های آهکی شاهد و اصلاح شده با زایکوترم مشخص می‌نماید که در سیکل‌های اول انجام تست، نمونه‌های شاهد در هر سه سطح کرنش دارای مقادیر سفتی بیشتری نسبت به نمونه‌های اصلاح شده متناظر می‌باشند. این در حالی است که از نیمه مقادیر سیکل‌های مربوط به معیار ۵۰ درصد، روند تغییر مقادیر

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده



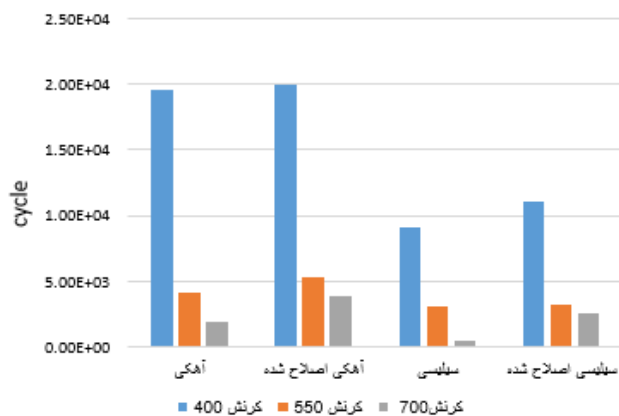
شکل ۸. مقایسه تغییرات مدول سفتی نسبت به سیکل‌های بارگذاری در کرنش‌های ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم سیلیسی شاهد و اصلاح شده با زایکوترم

تمایل به حفظ مقادیر سفتی بیشتر در مقایسه با نمونه‌های شاهد از خود نشان می‌دهند. نتیجه دیگری که از نمودار مقایسه مقادیر سفتی نمونه‌های مختلف آهکی و سیلیسی می‌توان استخراج کرد، بزرگتر بودن این مقادیر برای نمونه‌های آهکی در مقایسه با سیلیسی است.

#### ۶-۲. عمر خستگی رویکرد پدیدار شناختی

در شکل ۹، تعداد سیکل‌های بارگذاری صورت گرفته برای رسیدن به عمر ۵۰ درصد سفتی اولیه در کرنش‌های ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین برای کلیه مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم ساخته شده با یکدیگر مقایسه گردید.

روند تغییرات در مقادیر سفتی برای نمونه‌های مختلف اصلاح شده سیلیسی مشابه روند تغییرات در نمونه‌های آهکی اما با تغییر میزان عدد سفتی است. در مورد مخلوط‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی، اینگونه به نظر می‌رسد که نمی‌توان تحلیل و نتیجه‌ای که در مورد مخلوط‌های آهکی حاصل گردید را مورد استفاده قرار داد زیرا در ناحیه اول نمودار تغییرات سفتی، روال مشخصی از بزرگی یا کوچکی مقادیر سفتی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده وجود ندارد. روال تغییر در مقادیر سفتی نمونه‌های سیلیسی از حالت شاهد به حالت حاوی افزودنی همانند نمونه‌های آهکی می‌باشد. بدین صورت که پس از افت اولیه (قابل توجه پس از اتمام ناحیه اولیه) در سیکل‌های اول، نمونه‌های حاوی افزودنی زایکوترم



شکل ۹. مقایسه تعداد سیکل‌های بارگذاری صورت گرفته برای رسیدن به عمر ۵۰ درصد سفتی اولیه در کرنش‌های ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم آهکی و سیلیسی شاهد و اصلاح شده با زایکوترم

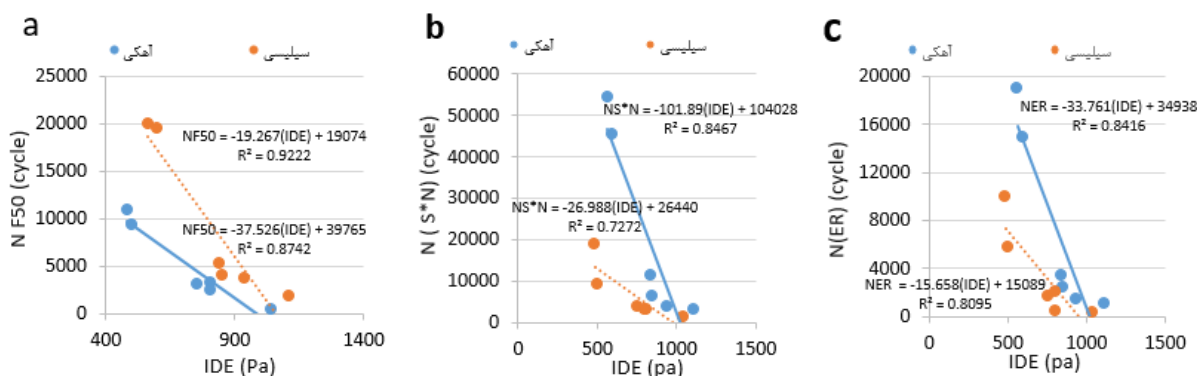
شکل ۱۰، عمر خستگی انواع مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق در سطوح کرنش ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ میکرواسترین، در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۱۰ هرتز قابل مشاهده است.

مقادیر بیانگر تأثیر مثبت به‌کارگیری افزودن زایکوترم در بهبود عمر خستگی نمونه‌های آهکی و سیلیسی و تأثیر بیشتر آن در نمونه‌های سیلیسی می‌باشد. هر چند که نمونه‌های آهکی دارای مقادیر عمر خستگی بیشتری (حدود ۲ برابر) نسبت به نمونه‌های سیلیسی می‌باشند.



شکل ۱۰. نتایج عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس سه معیار  $N_{F50}$ ،  $N_{S*N}$  و  $N_{ER}$

با افزایش سطوح کرنش،  $IDE$  افزایش می‌یابد. در شکل‌های a-۱۱ تا c-۱۱ رابطه بین  $IDE$  و عمر خستگی بر اساس سه معیار  $N_{F50}$ ،  $N_{S*N}$  و  $N_{ER}$  قابل مشاهده است که بیانگر روابط مناسب با ضریب همبستگی زیاد بین پارامترهای مذکور می‌باشند.



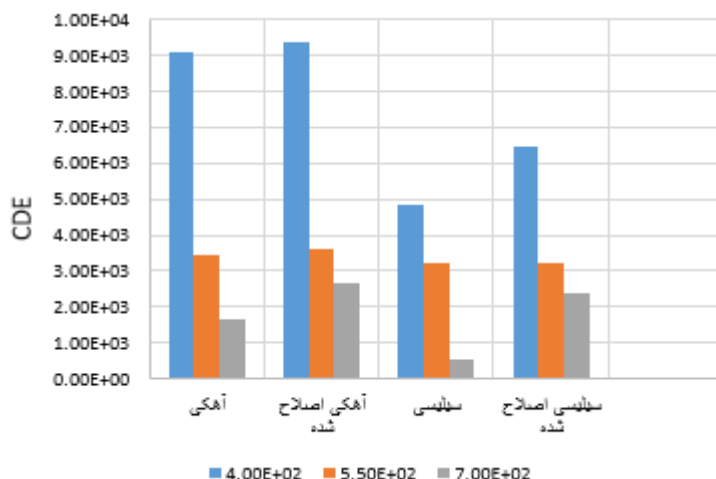
شکل ۱۱. رابطه بین  $IDE$  و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی (a)  $N_{F50}$ ، (b)  $N_{S*N}$ ، (c)  $N_{ER}$  ✓

شده نیز افزایش می‌یابد و این نشان دهنده این است که قابلیت میرا نمودن<sup>۱</sup> انرژی در نمونه‌های نیمه‌گرم حاوی زایکوترم بیشتر از سایر نمونه‌هاست. در شکل ۱۲، انرژی تلف شده تجمعی برای نمونه‌های مختلف شاهد و اصلاح شده آمده است.

همگرایی زیاد نتایج، تخمین عمر خستگی با استفاده از انرژی تلف شده اولیه را امکان‌پذیر می‌کند. مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم آهکی حاوی زایکوترم در میان سایر نمونه‌های نیمه‌گرم ساخته شده شاهد و اصلاح شده دارای بیشترین مقدار انرژی تلف‌شده تجمعی می‌باشد. مشاهده شد که با افزایش عمر خستگی، مقدار انرژی تلف

<sup>۱</sup>- Damping

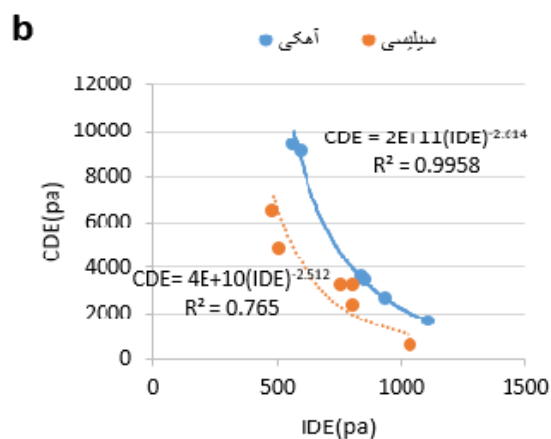
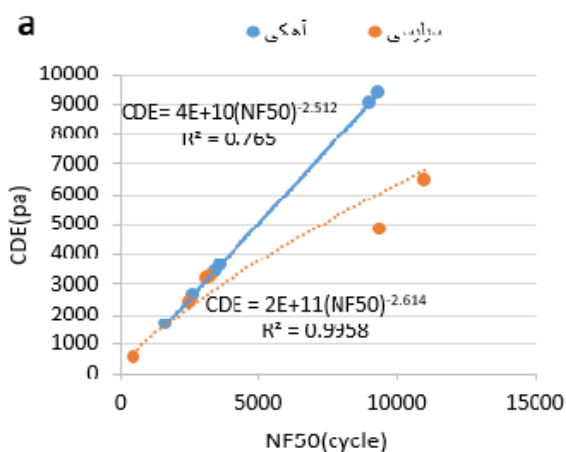
پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده



✓ شکل ۱۲. انرژی تلف شده تجمعی برای نمونه‌های مختلف شاهد و اصلاح شده

از مصالح سیلیسی به دلیل بیشتر بودن عمر خستگی، بیشتر می‌باشند. در شکل ۱۳، رابطه بین CDE با  $N_{f50}$  و IDE قابل مشاهده است.

افزایش سطوح کرنش به دلیل کاهش عمر خستگی و در نتیجه کاهش تعداد سیکل‌های بارگذاری سبب کاهش میزان CDE می‌گردد. همچنین، میزان CDE مصالح آهکی

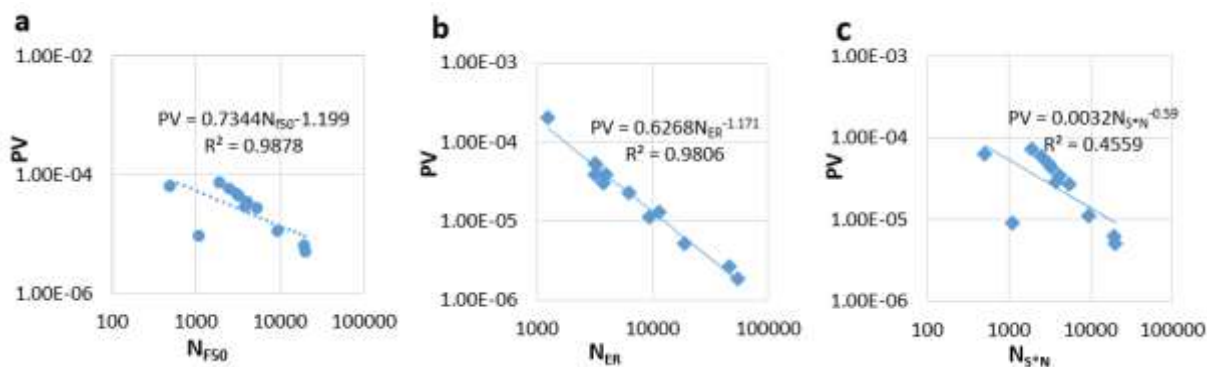


✓ شکل ۱۳. رابطه بین مجموع انرژی تلف شده و (a) عمر خستگی و (b) انرژی تلف شده اولیه مخلوط‌های آسفالتی

قابلیت اطمینان مناسبی به دست آورد. شکل ۱۴، رابطه بین PV با  $N_{f50}$ ،  $N_{S*N}$ ،  $N_{ER}$  را در مقیاس log-log نشان می‌دهد.

مقدار پارامتر CDE بر اساس پارامترهای  $N_{f50}$  و IDE قابل پیش بینی می‌باشد. در واقع، با داشتن مقدار انرژی تلف شده سیکل ۵۰ ام، می‌توان میزان CDE را برای مخلوط‌های متشکل از سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی با

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

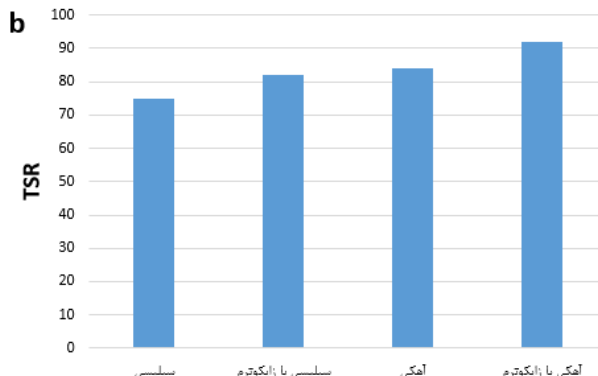
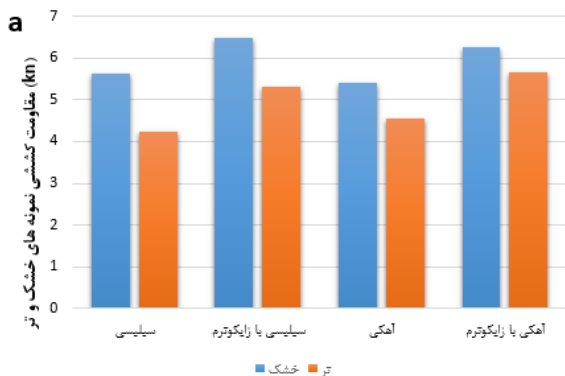


شکل ۱۴. رابطه بین PV و (a)  $N_{f50}$ ، (b)  $N_{ER}$ ، (c)  $N_{5+N}$  ✓

از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده بر مقاومت کششی نمونه‌های خشک، مقدار TSR به دست آمده است که شاخصی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین، به منظور مقایسه بهتر، مقدار TSR تمامی نمونه‌های تهیه شده شاهد و اصلاح شده با زایکوترم مخلوط‌های سیلیسی و آهکی به صورت یکجا در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

هرچه PV بیشتر باشد، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم کمتر است. نتایج حاکی از ارتباط بسیار خوب میان PV و  $N_{f50}$  بود.

## ۶-۲. نتایج تست حساسیت رطوبتی



شکل ۱۵. (a) مقایسه نتایج مقاومت کششی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با زایکوترم مخلوط‌های سیلیسی و آهکی و (b) نتایج TSR استفاده از افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی

در بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، باید اذعان کرد که هم مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم شاهد و هم مخلوط‌های اصلاح شده با زایکوترم تولید شده با مصالح آهکی، با داشتن TSR بیش از ۸۰٪، وضعیت بسیار مطلوبی دارند و در مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم سیلیسی، افزودنی مورد استفاده تأثیر بسیار چشمگیری روی این مصالح دارد و آن را در بازه‌ی قابل قبول قرار

## ۷. تحلیل نتایج

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت که افزودنی زایکوترم تأثیر مثبتی روی مقاومت مصالح سیلیسی در چرخه‌ی اشباع دارد و از کاهش چشمگیر مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه گرم جلوگیری کرده است. اگرچه این تأثیر مثبت در مصالح آهکی هم دیده می‌شود، ولی این تغییرات شایان ذکر نیست.

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

سیلان‌هایی که عملکرد آلی دارند در خلال فرایند هیدرولیز و در حضور آب، سیلانول تولید می‌کنند که این ماده سریعاً متراکم گشته و به فرم سیلوکسان حاوی اجزای آبگریز درمی‌آید و به صورت محلول در قیر باقی می‌ماند. در حالی که قسمت غیرآلی با هیدروکسیل سطح سیلیسی سنگ‌دانه‌ها پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند. در اثر گرم شدن، این پیوندهای هیدروژنی در هم فشرده شده و یا می‌شکنند و تولید لایه‌ای از پیوند Si-O-Si روی سطح سنگ‌دانه‌ها می‌کنند و چسبندگی قیر و مصالح سنگی را بهبود می‌بخشند (زیاری و همکاران، ۱۳۹۴).

#### ۸. سنجش آماری توزیع نرمال

جهت این سنجش، با توجه به کم بودن جامعه آماری، از آزمون شاپیرو-ویلک (SW) استفاده شد که نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

می‌دهد. همانطور که در مطالعات قبلی انجام شده روی مخلوط‌های آسفالتی گرم ساخته شده با مصالح سیلیسی و آهکی مشاهده شده بود، زایکوترم تأثیر بسیار بیشتری بر مصالح سیلیسی، نسبت به مصالح آهکی، داشته و ضعف این نوع مخلوط‌های آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی را تا حد قابل قبولی پوشش می‌دهد. در بررسی این پدیده می‌توان گفت که سنگ‌دانه‌های سیلیسی دارای کانی‌های کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) بوده و در هنگام حضور آب به علت پیوند هیدروژنی دارای چسبندگی ضعیفی هستند. سنگ‌دانه‌های آهکی دارای کانی‌های کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ ) و همچنین دولومیت ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) بوده، معمولاً دارای چسبندگی خوبی هستند و با قیر پیوندهای قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند. زایکوترم یک افزودنی بر پایه سیلان می‌باشد، سیلان، گروهی از سیلیکون‌های هیدروژن‌دار (هیدرید سیلیکون) است که دارای یک زنجیره آلی با تمایل به واکنش با قیر و یک انتهای قطبی با تمایل به ایجاد سطح غیرآلی (معدنی) می‌باشد.

جدول ۴. نتایج آزمون شاپیرو-ویلک (SW) برای برازندگی توزیع نرمال داده‌ها

متغیر	Statistic	df	سطح معنی داری	نتیجه آزمون
Pv ( $N_{F_{0.05}}$ )	۰/۹۳۲	۱۲	۰/۳۹۹	پارامتریک
$N_{F_{0.05}}$	۰/۷۳۵	۱۲	۰/۰۰۲	ناپارامتریک
Pv ( $N_{S*N}$ )	۰/۶۳۴	۱۲	۰/۰۰۰	ناپارامتریک
$N_{S*N}$	۰/۶۸۸	۱۲	۰/۰۰۱	ناپارامتریک
Pv ( $N_{ER}$ )	۰/۵۹۴	۱۲	۰/۰۰۰	ناپارامتریک
$N_{ER}$	۰/۷۷۳	۱۲	۰/۰۰۵	ناپارامتریک
IDE	۰/۹۴۸	۱۲	۰/۶۰۵	پارامتریک
CDE	۰/۸۸۶	۱۲	۰/۱۰۴	پارامتریک
عمر ۵۰ درصد	۰/۷۶۸	۱۲	۰/۰۰۴	ناپارامتریک
عمر ۳۵ درصد	۰/۷۳۷	۱۲	۰/۰۰۲	ناپارامتریک
مدول سفتی اولیه	۰/۴۷۸	۱۲	۰/۰۰۰	ناپارامتریک
مدول سفتی نهایی	۰/۹۶۷	۱۲	۰/۸۷۴	پارامتریک

پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

( $r = -0/004$ )  $N_{S*N}$  و ( $r = -0/009$ ) درصد ۳۵ عمر، رابطه مستقیم دارد. همچنین،  $N_{S*N}$ ، رابطه معکوس با IDE ( $r = 0/762$ ) و  $PV(N_{S*N})$  ( $r = 0/001$ ) داشته و رابطه مستقیم با عمر ۵۰ درصد ( $r = 0/013$ )، عمر ۳۵ درصد ( $r = 0/001$ )، مدول سفتی اولیه ( $r = 0/002$ ) و مدول سفتی نهایی ( $r = 0/001$ ) داشته است.  $N_{ER}$  رابطه معکوس با IDE ( $r = 0/003$ ) داشته و رابطه مستقیم با CDE ( $r = 0/001$ )، عمر ۵۰ درصد ( $r = 0/017$ )، عمر ۳۵ درصد ( $r = 0/005$ )، مدول سفتی اولیه ( $r = 0/003$ ) و مدول سفتی نهایی ( $r = 0/001$ ) داشته است.  $PV(N_{f50})$  با  $N_{f50}$  ( $r = 0/004$ )، رابطه معکوس داشته این موضوع در روابط بین  $N_{ER}$  و  $PV(N_{ER})$  و  $N_{S*N}$  و  $PV(N_{S*N})$  ( $r = 0/001$ ) نیز برقرار است. همچنین، بین متغیرهای پارامترهای تشخیص عمر خستگی ( $N_{ER}$ ،  $N_{S*N}$ ،  $N_{f50}$ ) نیز روابط مستقیم برقرار است.

با توجه به جدول ۴، متغیرهایی که سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ دارند، ناپارامتریک و متغیرهایی که سطح معناداری آنها بیش از ۰/۰۵ باشد پارامتریک می‌باشند. با توجه به این موضوع، متغیرهای  $N_{f50}$ ،  $PV(N_{S*N})$ ،  $N_{S*N}$ ،  $PV(N_{ER})$ ،  $N_{ER}$ ، عمر ۵۰ درصد، عمر ۳۵ درصد و مدول سفتی اولیه ناپارامتریک و متغیرهای  $PV(N_{f50})$ ، IDE، CDE، مدول سفتی نهایی پارامتریک می‌باشند. در این بخش، برای بررسی ارتباط میان متغیرهای پارامترهای تشخیص عمر خستگی ( $N_{ER}$ ،  $N_{S*N}$ ،  $N_{f50}$ ) و IDE، CDE، عمر ۵۰ درصد، عمر ۳۵ درصد، مدول سفتی اولیه، مدول سفتی نهایی،  $PV(N_{f50})$ ،  $PV(N_{S*N})$ ،  $PV(N_{ER})$  با توجه به ناپارامتریک بودن یک یا هر دو متغیر مورد بررسی، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. ضرایب همبستگی محاسبه شده به همراه بازه‌های اطمینان ۹۵٪ در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تنها آن دسته از همبستگی‌هایی که در سطح ۹۵٪ معنادار بوده‌اند در این جدول گزارش شده است. براساس نتایج جدول ۴؟۴،  $N_{f50}$  با CDE ( $r = -0/007$ )، عمر ۵۰ درصد ( $r = -0/008$ )

جدول ۵. ضریب همبستگی متغیرهای پارامترهای تشخیص عمر خستگی نسبت به متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	نام عامل	نوع رابطه	ضریب همبستگی	فاصله اطمینان ضریب همبستگی	
				۹۵٪ پایین	۹۵٪ بالا
$N_{f50}$	CDE	مستقیم	۰/۷۲۷	۰/۱۳۰	۱/۰۰
$N_{S*N}$	IDE	معکوس	-۰/۷۱۵	-۰/۹۰۵	-۰/۲۸۴
$N_{S*N}$	CDE	مستقیم	۰/۹۷۰	۰/۸۰۶	۱/۰۰
$N_{ER}$	IDE	معکوس	-۰/۷۴۱	-۰/۹۲۷	-۰/۲۶۸
$N_{ER}$	CDE	مستقیم	۰/۹۹۳	۰/۹۲۷	۱/۰۰
$N_{f50}$	عمر ۵۰ درصد	مستقیم	۰/۶۷۱	۰/۰۶۶	۰/۸۸۸
$N_{f50}$	عمر ۳۵ درصد	مستقیم	۰/۷۴۸	۰/۱۳۱	۱/۰۰
$N_{S*N}$	عمر ۵۰ درصد	مستقیم	۰/۶۳۷	۰/۱۰۲	۰/۳۵۶
$N_{S*N}$	عمر ۳۵ درصد	مستقیم	۰/۹۷۰	-۰/۲۸۵	-۰/۰۱۹
$N_{ER}$	عمر ۵۰ درصد	مستقیم	۰/۶۷۱	۰/۱۰۴	۰/۸۹۰
$N_{ER}$	عمر ۳۵ درصد	مستقیم	۰/۷۴۸	۰/۰۶۳	۰/۱۲۱
$N_{f50}$	مدول سفتی اولیه	مستقیم	۰/۶۴۳	۰/۰۸۷	۰/۹۹۳
$N_{f50}$	مدول سفتی نهایی	مستقیم	۰/۶۶۴	۰/۰۳	۰/۹۹۳



پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانوماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده

۰/۰۵۶	-۰/۳۱۲	۰/۷۵۷	مستقیم	مدول سفتی اولیه	$N_{S*N}$
۰/۸۰۵	۰/۷۰۴	۰/۹۲۸	مستقیم	مدول سفتی نهایی	$N_{S*N}$
۱/۰۰	۰/۱۰۶	۰/۷۳۴	مستقیم	مدول سفتی اولیه	$N_{ER}$
۱/۰۰	۰/۸۷۲	۰/۹۷۹	مستقیم	مدول سفتی نهایی	$N_{ER}$
-۰/۷۹	-۱/۰۰	-۰/۷۲۷	معکوس	PV ( $N_{F50}$ )	$N_{F50}$
-۰/۸۲۵	-۱/۰۰	-۰/۹۷۴	معکوس	PV ( $N_{S*N}$ )	$N_{S*N}$
-۰/۸۲۵	-۱/۰۰	-۰/۹۷۹	معکوس	PV ( $N_{ER}$ )	$N_{ER}$
۱/۰۰	۰/۰۴۷	۰/۷۱۸	مستقیم	$N_{S*N}$	$N_{F50}$
۱/۰۰	۰/۰۳۶	۰/۷۲۰	مستقیم	$N_{S*N}$	$N_{ER}$

با توجه به نتایج آزمایش مارشال، درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی به ترتیب ۴/۵ و ۴/۸ درصد به دست آمد که این میزان برای حدود یک تن آسفالت ۴۸ کیلو قیر بوده که به میزان ۵۰ گرم زایکوترم اضافه می‌شود که این میزان به اندازه ۶ درصد قیمت تمام شده آسفالت می‌باشد که با توجه به بهبود عمر خستگی این مخلوط‌ها و بهبود خصوصیات حساسیت رطوبتی مقرون به صرفه می‌باشد (جدول ۶).

آزمون ANOVA فریدمن نشان داد که تفاوت معناداری بین پارامترهای تشخیص عمر خستگی ( $N_{F50}$ ،  $N_{ER}$ ،  $N_{S*N}$ ) و PV مخلوط‌های مختلف وجود دارد ( $X^2_{(2)}=19/447, P< 0/001$ ).

## ۹. تحلیل مالی و اقتصادی

جدول ۶. هزینه تولید آسفالت حاوی زایکوترم

قیمت هر کیلوگرم زایکوترم (تومان)	درصد قیر	میزان مصرف زایکوترم	هزینه زایکوترم مصرفی در	نسبت هزینه آسفالت حاوی زایکوترم
زایکوترم (تومان)	بهبود آسفالت	در یک تن آسفالت	یک تن آسفالت تولید شده با	در مقایسه با آسفالت معمولی
		(گرم)	زایکوترم (تومان)	
۹۵۰۰۰	۴/۸	۵۰ گرم	۴۷۵۰۰	۱/۰۶

زایکوترم استفاده کرد. برای تمام سطوح کرنش، افزودن زایکوترم باعث افزایش CDE و در نتیجه افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم می‌شود.

• بر اساس نتایج به دست آمده، معنی داری رابطه بین PV و عمر خستگی تأیید شده است. هرچه PV بیشتر باشد، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم کمتر بوده و بین عمر خستگی و PV بدون در نظر

## ۱۰. نتیجه گیری

- تحقیقات صورت گرفته نشان داد که می‌توان با تعیین پارامتر IDE، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را پیش‌بینی نمود و بین IDE و عمر خستگی بر اساس سه معیار  $N_{F50}$ ،  $N_{S*N}$  و  $N_{ER}$  روابط مناسبی با ضریب همبستگی زیاد موجود می‌باشند که در رابطه بین  $N_{F50}$  و IDE بیشترین مقدار همبستگی وجود داشت.
- می‌توان با اطمینان از IDE برای تخمین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با

آسیب‌پذیری بیشتری را نشان داده و کاهش قابل توجه مقاومت کششی غیرمستقیم مصالح سیلیسی نسبت به مصالح آهکی مشهود است. در صورتی که این اختلاف در حالت غیراشباع وجود ندارد.

### ۱۱. پیشنهادها

- ۱- انجام آزمایش‌های تکمیلی نظیر آزمایش‌های شارپ روی نمونه‌های قیر شاهد و قیر حاوی افزودنی نیمه‌گرم
- ۲- بررسی اثر پارامترهای تأثیرگذار دیگر بر خرابی خستگی چون دما، پیرشدگی، تغییر دانه‌بندی، فرکانس و کرنش بارگذاری
- ۳- مطالعه سایر مفاهیم خرابی نظیر مکانیک شکست و مکانیک آسیب در مخلوط آسفالتی و مقایسه آنها با نتایج روش انرژی تلف شده تا روشی با بیشترین اطمینان از رفتار این نوع مواد در دسترس قرار گیرد.

گرفتن نوع مخلوط و سطح کرنش، رابطه مستقیم وجود دارد.

- زایکوترم بر مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم سیلیسی در چرخه اشباع اثر مثبتی داشته و از کاهش چشمگیر مقاومت آن جلوگیری می‌کند.
- مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه اشباع به خشک (TSR)، برای مخلوط‌های آسفالتی آهکی بیشتر از مخلوط‌های سیلیسی می‌باشد.
- استفاده از افزودنی زایکوترم در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم آنها در حالت اشباع شد که نشان‌دهنده تأثیر این افزودنی بر افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی است.
- زمانی که نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم ساخته شده با مصالح سیلیسی در شرایط اشباع قرار می‌گیرند، نسبت به نمونه‌های مشابه آهکی با شرایط یکسان،

### ۱۲. مراجع

- ایزدی، ا. ۱۳۹۱. "تحلیل خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم در اثر پیرشدگی و ارائه مدل شیارشدگی". رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت، تهران.
- زیاری، ح.، میرزابابی، پ. و باباگلی، ر. ۱۳۹۴. "تأثیر نوع مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم اصلاح شده با زایکوترم". مهندسی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ۱(۳): ۶۳-۷۶.
- زیاری، ح.، باباگلی، ر. و میرزابابی، پ. ۱۳۹۷. "بررسی رفتار خستگی و خصوصیات شیارشدگی قیرهای حاوی افزودنی نیمه‌گرم". مهندسی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ۴(۴): ۱-۱۴.
- عامری، م.، امیری هرمزکی، م. و وامق، م. ۱۳۹۶. "ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) با مواد افزودنی‌های گرم آلی و شیمیایی". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۰(۴): ۹۸۷-۱۰۰۲.
- فخری، م. و هاشم نژاد، ا. ۱۳۹۴. "ارزیابی تأثیر افزودنی نیمه‌گرم با تکنولوژی نانومواد (زایکوترم) بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک". کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و زیرساخت‌های شهری، تبریز.
- معمدی، م. ۱۳۹۹. "تحلیل آزمایشگاهی خستگی قیر، ماستیک و مخلوط بتن آسفالتی به روش مکانیک آسیب پیوسته". رساله دکتری، دانشگاه سمنان.

Akbari, A. and Modarres, A. 2020. "Fatigue response of HMA containing modified bitumen with nano-clay and nano-alumina and its relationship with surface free energy parameters". Road Mater. Pavement Design, 21(6): 1490-1513. doi:10.1080/14680629.2018.1553733

- Ameri, M., Seif, M., Abbasi, M., Molayem, M. and KhavandiKhiavi, A. 2017. "Fatigue performance evaluation of modified asphalt binder using of dissipated energy approach". *Constr. Build. Mater.*, 136: 184-191. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.010
- Ayazi, M. J., Moniri, A. and Barghabany, P. 2017. "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(9): 890-895. doi.org/10.1080/10916466.2017.1290655
- Carpenter, S. H. and Shen, S. 2006. "Dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue". *Transport. Res. Record*, 1970(1): 178-185. doi: 10.1177/0361198106197000119
- De Al Babadopulos, L. F., Soares, J. B., Ferreira, J. L. S. and do Nascimento, L. A. H. 2018. "Fatigue cracking simulation of aged asphalt pavements using a viscoelastic continuum damage model". *Road Mater. Pavement Design*, 19(3): 546-560. doi: 10.1080/14680629.2018.1418715
- Enieb, M. and Diab, A. 2017. "Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 10(2): 148-157. doi: 10.1016/j.ijprt.2016.11.009
- Ghuzlan, K. A. 2001. "Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts". Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ghuzlan, K. A. and Carpenter, S. H. 2000. "Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing". *Transport. Res. Record*, 1723(1): 141-149. doi: 10.3141/1723-18
- Izadi, A., Motamedi, M., Alimi, R. and Nafar, M. 2018. "Effect of aging conditions on the fatigue behavior of hot and warm mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 188: 119-129. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.119
- Huang, Y. H. 2004. "Pavement analysis and design". Pearson Prentice Hall, N. J.
- Kordi, Z. and Shafabakhsh, G. 2017. "Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>". *Constr. Build. Mater.*, 134: 530-539. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.202
- Modarres, A. and Aloogar, A. 2017. "Comparison between the fatigue response of hot and warm mix asphalts based on the dissipated energy approach". *Int. J. Pavement Eng.*, 18(1): 60-72. doi: 10.1080/10298436.2015.1053481
- Moghadas Nejad, F., Notash, M. and Forough, S. A. 2015. "Evaluation of healing potential in unmodified and SBS-modified asphalt mixtures using a dissipated-energy approach". *J. Mater. Civ. Eng.*, 27(12): 04015060. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001322
- Oliveira, J. R., Silva, H. M., Abreu, L. P. and Fernandes, S. 2013. "Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures". *J. Clean. Prod.*, 41: 15-22. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.09.047
- Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L. and Chiappinelli, G. 2015. "Fatigue and healing properties of nano-reinforced bituminous binders". *Int. J. Fatigue*, 80: 30-39. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.05.008
- Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H. and Huang, H. 2006. "A dissipated energy approach to fatigue evaluation". *Road Mater. Pavement Design*, 7(1): 47-69. doi: 10.1080/14680629.2006.9690026
- Shen, S. 2006. "Dissipated energy concepts for HMA performance: Fatigue and healing". Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.