



Semnan University



Research Article

The effect of loading frequency and temperature on the performance of geocomposite reinforced asphalt overlays in controlling reflective cracks

Asadi, S.^a , Shafabakhsh, Gh.^{b*} ^a PhD Candidate of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I.R. Iran.^b Professor, Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I.R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-06-21

Revised: 2022-12-08

Accepted: 2022-12-16

Keywords:

Reflective crack;

Geosynthetic;

Loading frequency;

Fatigue.

ABSTRACT

Huge sums of money are spent annually on the maintenance of road pavements due to premature reflective deterioration of the roads surface, which a large part of it is related to road surface paving. Accordingly, in order to prevent the propagation of reflective cracks in newly coated pavements, various methods have been used and researched. Results have shown that all the adopted reflective crack control methods have only delayed the propagation of this type of crack. However, some methods have greater impact on the appearance of reflective cracks and reducing the intensity of these cracks, and one of the best methods is the use of geosynthetic products and interlayers. In this research, the performance of two different types of geocomposite (with tensile strengths of 50 kN/m and 100 kN/m) in asphalt pavements in delaying the initiation of reflective cracks compared to control samples at different temperatures and loading frequencies was experimentally investigated. Based on these studies, it was observed that the use of type I geocomposite with high tensile strength is the most effective in increasing the fatigue life. Among the mentioned factors, the temperature had the most negative effect on this performance. After the temperature, the type of geocomposite used in terms of tensile strength and then the loading intensity (about 53,000 cycles of loading difference, between 40 °C and 0 °C) on the reinforced asphalt coatings. Based on the results of variance analysis of the fatigue life model obtained in this research, the R² and adjusted R² values are 0.987 and 0.981, respectively, which indicates the high accuracy of the presented model.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2022.27571.1604>

* Corresponding author.

E-mail address: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

How to cite this article: Asadi, S., & Shafabakhsh, G. A. (2023). The effect of loading frequency and temperature on the performance of geocomposite reinforced asphalt overlays in controlling reflective cracks. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), 39-56. doi: [10.22075/jtie.2022.27571.1604](https://doi.org/10.22075/jtie.2022.27571.1604)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

اثر فرکانس بارگذاری و دما، بر عملکرد روکش‌های آسفالتی مسلح ژئوکامپوزیتی در کنترل ترک‌های انعکاسی

سعید اسدی^۱، غلامعلی شفابخش^{۲*}

^۱دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

^۲استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵

واژگان کلیدی:

ترک انعکاسی،

ژئوسنتتیک،

فرکانس بارگذاری،

خستگی،

چکیده

سالانه مبالغ هنگفتی صرف تعمیر و نگهداری روسازی راه به دلیل خرابی زودرس انعکاسی سطح جاده‌ها می‌شود که بخش زیادی از آن مربوط به روکش کردن سطح جاده‌ها می‌باشد. بر همین اساس، به منظور جلوگیری از گسترش ترک‌های انعکاسی در روسازی‌های تازه روکش شده در دنیا، روش‌های گوناگونی مورد استفاده و تحقیق قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده که تمامی روش‌های کنترل ترک‌های انعکاسی اتخاذ شده، تنها منجر به تأخیر انداختن در انتشار این نوع ترک شده‌اند. به هر حال، بعضی از روش‌ها باعث تأثیر بیشتر بر ظهور ترک‌های انعکاسی و کاهش شدت مقدار این ترک‌ها شده‌اند که یکی از بهترین روش‌ها، استفاده از محصولات و میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک می‌باشد. در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی عملکرد دو نوع مختلف ژئوکامپوزیت (با مقاومت‌های کششی ۵۰ و ۱۰۰ کیلونیوتن بر متر) در روکش‌های آسفالتی در به تأخیراندازی ترک انعکاسی، نسبت به نمونه‌های کنترلی، در دماها و فرکانس‌های مختلف بارگذاری پرداخته شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، مشاهده شد که استفاده از ژئوکامپوزیت نوع I با مقاومت کششی زیاد، بیشترین کارایی را در افزایش عمر خستگی دارد. در بین عوامل یاد شده، پارامتر دما بیشترین تأثیر منفی را بر این عملکرد داشت. بعد از دما، به ترتیب نوع ژئوکامپوزیت مصرفی از نظر مقاومت کششی و سپس شدت بارگذاری، بیشترین تأثیر را بر تغییرات عمر خستگی (حدود ۵۳۰۰۰ سیکل بارگذاری اختلاف، بین دمای ۴۰ و صفر درجه سلسیوس) روکش‌های آسفالتی مسلح شده گذاشتند. بر اساس نتایج آنالیز واریانس مدل عمر خستگی به دست آمده در این پژوهش، مقدار R^2 و $Adjusted R^2$ به ترتیب برابر ۰/۹۸۷ و ۰/۹۸۱ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت زیاد مدل ارائه شده است.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2022.27571.1604>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: gshafabakhsh@semnan.ac.ir

استناد به این مقاله: اسدی، سعید & شفابخش، غلامعلی. (۱۴۰۲). اثر فرکانس بارگذاری و دما، بر عملکرد روکش‌های آسفالتی مسلح ژئوکامپوزیتی در کنترل ترک‌های انعکاسی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل. ۳۹-۵۶، (۳)۹. doi: 10.22075/jtie.2022.27571.1604

۱. مقدمه

به‌طور کلی، ایجاد ترک در روسازی به دلیل ضعف مقاومت روسازی در برابر عوامل ایجادکننده تنش‌های کششی و برشی، تحت اثر پدیده خستگی و نیز افزایش سطح تنش‌های وارده نسبت به مقاومت نهایی آسفالت می‌باشد (دیلمی و وایت، ۲۰۲۰؛ کانستراری و اینگراسیا، ۲۰۲۰). خستگی عبارت است از کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی یک ماده تحت تأثیر بارگذاری‌های تکراری، تا زمانی که تنش ایجاد شده از یک مقدار حداقل σ_0 ، به نام حد خستگی، بیشتر باشد. پدیده خستگی نهایتاً منجر به رخداد ترک و پس از آن پیشرفت ترک رو به سطح خواهد شد (سورش، ۱۹۹۸؛ الوی و همکاران، ۲۰۱۹). این امر به‌نوبه خود راه را برای نفوذ عوامل فرساینده به روسازی باز نموده و فرآیند اضمحلال روسازی را تسریع می‌نماید. بر همین اساس، پیش‌بینی عمر خستگی مسئله بسیار مهمی در فرآیندهای طراحی و ارزیابی مدیریت روسازی‌های آسفالتی می‌باشد. با توجه به این ضرورت، در طول سالیان اخیر تلاش‌های مستمری در جهت ارائه و توسعه مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی روسازی در جریان بوده است (ون دیک و ویسر، ۱۹۷۷؛ لایتون، ۱۹۸۹؛ مدانی و مولنار، ۲۰۰۰؛ کیم و همکاران، ۲۰۰۳؛ شن و کارپنتر، ۲۰۰۷؛ خدایی و همکاران، ۲۰۰۹؛ لیوا پادیا و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی از اصلی‌ترین مشکلات مربوط به روکش‌های با ضخامت کم، ترک‌های انعکاسی می‌باشد. معمولاً این پدیده به‌عنوان گسترش ترک‌هایی که ناشی از حرکت و جابجایی روسازی زیرین و یا لایه اساس تثبیتی به داخل لایه روکش جدید می‌باشد بیان می‌گردد. این حرکت‌ها ناشی از بارگذاری‌های ترافیکی است که منجر به تغییرشکل‌های مختلف در ترک‌ها در لایه زیرین روسازی می‌گردد، یا به خاطر انقباض و انقباض خاک بستر، یا انقباض و انقباض روسازی ناشی از تغییرات حرارت، یا ترکیب‌هایی از این قبیل پدیده‌ها که

زیرمجموعه ترک‌های خستگی هستند، می‌باشد (شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰؛ یانگ، ۲۰۱۸). حرکت روسازی، که توسط یکی از عوامل بالا ناشی می‌شود، باعث ایجاد تنش‌های کششی و یا برشی در روکش جدید می‌گردد. وقتی این تنش‌ها از مقدار مقاومت کششی برشی روکش آسفالتی بیشتر گردند، ترک در روکش جدید توسعه می‌یابد. این گسترش الگوی ترک خوردگی روسازی زیرین که از روسازی قدیمی به روکش جدید انتقال می‌یابد را ترک‌های انعکاسی می‌نامند (نایر و هبوچه، ۲۰۲۰). روش‌های گوناگونی برای کنترل ترک‌های انعکاسی اتخاذ شده است. اما هیچ‌کدام از آن‌ها موفقیت‌آمیز نبوده‌اند و تنها منجر به تأخیر انداختن در این نوع ترک شده‌اند. به هر حال، بعضی از روش‌ها باعث تأثیر بیشتری در ظهور ترک‌های انعکاسی و کاهش شدت مقدار این ترک‌ها شده‌اند. یکی از جدیدترین و بهترین روش‌ها، استفاده از محصولات ژئوستنتیک می‌باشد (رامساموج، ۲۰۰۱).

بر اساس عملکرد ژئوستنتیک‌ها در صنعت، تنها دو نوع ژئوتکستایل و ژئوگرید در تقویت آسفالت کاربرد خواهند داشت. ژئوگریدها به علت داشتن سختی زیاد، توانایی جذب تنش‌های وارده به آسفالت را دارند. از این‌رو، بیشتر به‌عنوان لایه مسلح‌کننده آسفالت به‌کار برده می‌شوند. این مسلح‌سازی منجر به تأخیر در انتقال ترک زیرین به سطح روسازی و جلوگیری از بروز ترک‌های انعکاسی می‌شود (خدادادی و همکاران، ۱۳۸۴؛ کی‌منش و اسلامی، ۱۳۹۲). از مهم‌ترین عوامل بروز ترک در روسازی‌های موجود، عبور و مرور زیاد وسایل نقلیه و انقباض و انقباض روسازی در اثر تغییرات دمایی می‌باشد. عبور و مرور زیاد وسایل نقلیه و تغییرات دمایی در ارتباط با پدیده خستگی بوده و ترک‌های ناشی از خستگی در روسازی‌ها عموماً به این دو علت روی می‌دهند. بر اساس مطالعات پیشین، مشاهده شده که ژئوستنتیک‌ها می‌توانند مقاومت روسازی را در برابر ترک‌های انعکاسی تا چهار

مدول بالا، از تأثیر بیشتری نسبت به ژئوتکستایل‌ها و لایه‌های جذب‌کننده تنش در به‌تأخیراندازی ترک‌های انعکاسی برخوردار می‌باشند. به‌عبارت دیگر، می‌توان گفت که کارایی نمونه‌های مسلح با ژئوگرید بین سه تا شش برابر نمونه‌های غیرمسلح می‌باشد (زامورا باروزا و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، نتیجه می‌شود که هر چه میزان سختی ژئوگریدها بیشتر شود، میزان مقاومت آن‌ها در برابر تغییرشکل زیر بار بیشتر می‌شود. البته باید اشاره کرد که کارایی ژئوگرید بسیار وابسته به میزان قیر تک^۱ می‌باشد. بر همین اساس، تعیین درست میزان قیر بهینه تک برای کارایی هر چه بهتر این نوع ژئوستتیک‌ها در روکش، از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد (زامورا باروزا و همکاران، ۲۰۱۱). تأثیر دماهای مختلف بر نحوه رشد ترک‌های خستگی توسط خدایی و همکاران (۲۰۰۹) انجام شد و مشاهده گردید که دماهای مختلف در مقدار ترک و مسیر شروع حرکت ترک نقش دارند؛ به‌گونه‌ای که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، برخلاف دمای ۲۰ درجه سلسیوس که روند گسترش ترک برای تمام نمونه‌ها با روسازی قدیمی آسفالتی از کف روکش به سمت سطح روکش بود، برای نمونه‌های مسلح‌شده در وسط ضخامت، ترک‌ها ابتدا از کف لایه شروع شده و به سمت ژئوگرید و سپس از سطح روکش دوباره شروع شده و به سمت پایین گسترش یافت.

تأثیر دما و فرکانس بارگذاری مختلف در مخلوط‌های دارای لایه SAMI و با استفاده از دستگاه ویل ترک نیز بررسی شد و مشاهده گردید که این لایه‌ها قادر در به تأخیر انداختن ترک‌های انعکاسی در دماهای ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس بودند؛ اما در دمای ۱۰ درجه مؤثر واقع نشدند (آگوندیپ و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، این لایه‌های جاذب تنش در مقابله با بارهای کمتر عملکرد بهتری نسبت به بارهای بیشتر از خود به نمایش گذاشتند. تأثیر تقویت ژئوکامپوزیت بر ترک خستگی، ترک

برابر افزایش دهند. در سال ۱۹۹۳، تحقیقاتی توسط وانلسترته و فرانکن روی روسازی‌های صلب (بتنی) درزدار یا ترک‌خورده همراه با میان‌لایه‌های مسلح‌کننده و روکش‌های آسفالتی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود انجام گرفت و اثر مسلح‌کننده‌ها در ایجاد تأخیر در زمان شروع رشد ترک در روکش (ترک انعکاسی) مورد اثبات قرار گرفت. بعدها اثبات شد که وجود مسلح‌کننده‌ها باعث بهبود افزایش مقاومت خستگی روسازی می‌شود (خدایی و همکاران، ۲۰۰۹؛ مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۵). تحقیقات پژوهشگران مختلف به این نتیجه رسیده که ژئوکامپوزیت‌ها و انواع مختلف آن‌ها به‌عنوان عامل بازدارنده‌ی ترک برای ترمیم روسازی‌های موجود، کاهش میزان تنش برشی افقی و همچنین کرنش‌های کششی در نوک ترک عمل می‌کنند (سبحان و تاندون، ۲۰۰۸؛ فروتی و همکاران، ۲۰۱۲؛ پاسکوئینی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۶؛ سرید و کومار، ۲۰۱۷؛ اینگراسیا و همکاران، ۲۰۲۰). اثر مسلح‌سازی آسفالت توسط ژئوگریدهای مختلف نیز مورد پژوهش قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که استفاده از الیاف شیشه و ژئوتکستایل بافته نشده باعث افزایش عمر ۷ الی ۸ برابری نسبت به حالت تقویت‌نشده گردید (ژاکلین و شرر، ۱۹۹۶). در حالی که استفاده از ژئوگریدهای پروپیلنی و یا پلی‌استری باعث افزایش ۳ الی ۴ برابری نسبت به حالت بدون تقویت‌کننده گردید (ژاکلین و شرر، ۱۹۹۶). نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان داده که در هنگام استفاده از سیستم‌های ضد ترک‌های انعکاسی، نوع میان‌لایه و یا ژئوستتیک، و نوع و مقدار قیر مصرفی برای ایجاد چسبندگی بین لایه‌ها در به‌تأخیراندازی رشد ترک بسیار مهم می‌باشد (نگوین و همکاران، ۲۰۱۳؛ فلاح و خدایی، ۲۰۱۵؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۹؛ دیلمی و وایت، ۲۰۲۰). در این میان، آنالیزها نشان داده که ژئوستتیک‌ها، به‌ویژه ژئوگریدها با

¹ - Tack coat

عمر خستگی بر اساس متغیرهای مربوطه بررسی و ارائه می‌گردد.

۲. ساخت نمونه

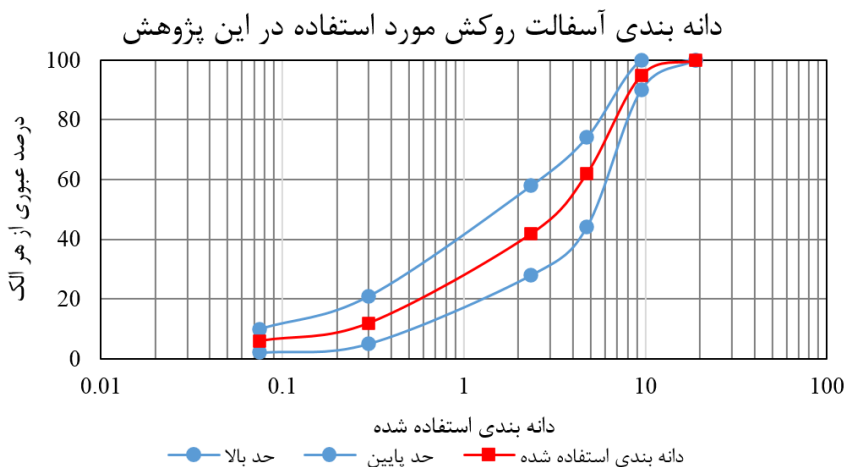
مشخصات مصالح سنگی به‌کار رفته، نوع قیر مصرفی، روش ساخت نمونه‌ها و آماده‌سازی آن‌ها برای آزمایش، از عوامل مهم در تبیین روش آزمایش می‌باشند که در این قسمت توضیح داده شده‌اند.

۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

مصالح سنگی مورد استفاده در برنامه آزمایشگاهی از کارخانه تولیدکننده آسفالت روکش محور قزوین و از نزدیکی شهر آبیگ تأمین گشته است. لازم به ذکر است که جنس مصالح مصرفی از نوع آهکی بود. دانه‌بندی مصالح مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است. درصدهای مختلف مورد استفاده در طرح مخلوط در جدول ۱ نشان داده شده است. برای تهیه نمونه‌های آسفالتی گرم از قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه تهران استفاده گردید که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین، پایه قیر محلول مورد استفاده در این تحقیق به عنوان تک کت از جنس ۸۵-۱۰۰ می‌باشد.

انعکاسی و تجمع تغییرشکل دائمی روسازی‌های آسفالتی نازک نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که تمام ژئوکامپوزیت‌ها با کاهش کرنش عمودی در بالای بستر، مقاومت تغییرشکل دائمی را در مقایسه با روسازی تقویت نشده بهبود بخشیدند. علاوه بر این، ژئوکامپوزیت‌ها انرژی لازم برای انتشار ترک را با توجه به روسازی غیرمسلح سه تا هشت برابر افزایش دادند (اینگراسیا و همکاران، ۲۰۲۰). به‌طور کلی، این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ژئوکامپوزیت‌ها می‌تواند طول عمر روسازی‌های آسفالتی نازک را از نظر ترک‌خوردگی و تجمع تغییرشکل دائمی افزایش دهد.

در تحقیق حاضر سعی شده به بررسی ایجاد ترک خستگی در نمونه‌های دال شکل آسفالتی با میان‌لایه‌های مختلف ژئوکامپوزیتی و کنترلی تحت شدت بارگذاری‌های متفاوت سیکی دینامیک در مد خمشی پرداخته شود. در این تحقیق، در یک بررسی جامع و ابتکاری، از متغیرهای دما (صفر (حد کم)، (حد میانه) و ۴۰ (حد زیاد) درجه سلسیوس) و شدت بارگذاری (فرکانس ۲ (سرعت کم)، ۶ (سرعت متوسط) و ۱۰ (سرعت زیاد) هرترز) در بازه‌های مختلف، برای شبیه‌سازی بهتر آزمایش‌های ترک‌های انعکاسی بر عملکرد این‌گونه مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک در روکش‌های آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین، با آنالیز آماری، مدل



جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

نتایج آزمایش‌ها			شرح آزمایش‌ها
فیلر	ماسه شکسته	مخلوط درشت دانه	
-	۷۱	سیلوی سرد	ارزش ماسه‌ای
	۷۵	سیلوی گرم	
-	-	۲۰.۵	درصد سایش
غیر قابل اندازه‌گیری	غیر قابل اندازه‌گیری	-	حد روانی
-	-	-	حد خمیری
N.P	N.P	-	ضریب خمیری
-	-	>۹۵ درصد	در یک جبهه
-	-	>۹۵ درصد	در دو جبهه
-	-	۱/۸	ریزدانه
-	-	۰/۷	درشت‌دانه
۹۵۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع			خشک
۸۹۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع			اشباع

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی در این پژوهش

نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیر خالص
	AASHTO	ASTM	
۱/۰۲۰	T228	D70	وزن مخصوص
۶۰	T49	D5	درجه نفوذ
۴۹/۴	T53	D36	حداقل نرمی (ساچمه - حلقه) برحسب درجه سلسیوس
بیش از ۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سلسیوس، برحسب سانتی متر
۳۲۰	T48	D92	درجه اشتعال برحسب درجه سلسیوس
۶۷۶	T201	D2170	کند روانی کینماتیک در ۱۲۰ درجه سلسیوس (سانتی استوکس)
۳۱۱	T201	D2170	کند روانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه سلسیوس (سانتی استوکس)
۱۵۳	T201	D2170	کند روانی کینماتیک در ۱۶۰ درجه سلسیوس (سانتی استوکس)



همراه با سایر مواد پلیمری و یا غیرپلیمری نیز تولید می‌گردند. ژئوکامپوزیت‌های آسفالتی ترکیباتی دو یا چندتایی از ژئوتکستایل‌ها و ژئوگریدها می‌باشند که در ساخت آن‌ها ممکن است محصولات غیرپلیمری نظیر فایبرگلاس و رشته‌های فولادی برای افزایش مقاومت

دیگر مصالح مورد استفاده در این پژوهش، ژئوکامپوزیت می‌باشد. ژئوکامپوزیت‌ها به‌عنوان یکی از انواع ژئوستتیک‌ها، محصولاتی پلیمری هستند که معمولاً مصنوعات ساخته شده از ترکیب دو یا چند نوع ژئوستتیک مختلف هستند. این محصولات گاهی اوقات

کششی به کار رود. هدف از ساختن ژئوکامپوزیت‌ها ایجاد میان‌لایه‌هایی است که در عملکردهایی نظیر مسلح-کنندگی ژئوگرید و جاذب تنش بودن ژئوتکستایل در آسفالت مؤثر باشند. در مطالعه حاضر، از ژئوکامپوزیت

از جنس شیشه که پیشینه‌ی خوبی در مسلح‌سازی روکش‌های آسفالتی داشته است با دو مقاومت ۵۰ و ۱۰۰ کیلونیوتن بر متر استفاده گردید (جدول ۳).

جدول ۳. مشخصات ژئوکامپوزیت‌های استفاده شده در این پژوهش

نمونه	نوع میان‌لایه	شرکت تولیدکننده	جنس میان‌لایه	تصویر میان‌لایه
G _I	I ژئوکامپوزیت ۱۰۰-۱۰۰	ژئو شبکه پارسیان ۱۰۰ (تولید شرکت: ژئو شبکه پارسیان)	Glass grid	
G _{II}	II ژئوکامپوزیت ۵۰-۵۰	ژئو شبکه پارسیان ۵۰ (تولید شرکت: ژئو شبکه پارسیان)	Glass grid	
مشخصات فنی				
ردیف	مقدار قیر مصرفی جهت چسبندگی با لایه‌های آسفالتی (kg/m ²)	مقاومت کششی در جهت اول (kN/m)	مقاومت کششی در جهت دوم (kN/m)	
۱	۰/۹	۱۰۰	۱۰۰	
۲	۰/۹	۵۰	۵۰	

روسازی قدیمی قرار داده شدند. بر همین اساس، برای ساخت روسازی قدیمی بتن آسفالتی، مخلوط آسفالتی مورد نظر با وزن مورد نیاز (به‌طور مثال وزن ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم)، در قاب فلزی مکعبی دستگاه پرس باکس با ابعاد 450 mmL×150 mmW×185 mmH ساخته شد. نمونه‌ها مطابق شکل ۲ در ارتفاع از وسط، در طول به میزان ۰/۵ سانتی‌متر از یک طرف و در عرض به میزان ۱ سانتی‌متر در یک طرف برش داده شدند. پس از ساخت نمونه کف و برشکاری آن بر اساس محاسبات انجام شده و مورد نیاز، ترک‌هایی با عرضه‌ای مورد نیاز در لایه پایینی ایجاد شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از ایجاد ترک درست در قسمت میانی طولی نمونه، فضای ایجاد شده در ترک با استفاده از مواد پُرکننده پر شد تا پس از ساخت لایه بالایی، ترک توسط مصالح و قیر پر نشود. لازم به ذکر است که عرض این ماده پُرکننده متناسب با عرض ترک (۶ میلی‌متر) باشد و جنس آن باید

طرح اختلاط تمامی روکش‌های آسفالتی ساخته شده بر اساس استاندارد ساخت مارشال (ASTM D 1559) و با مشخصات ثابت انجام شده است. بر اساس داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های مارشال، مقدار ۴/۵۵ درصد وزنی مخلوط به‌عنوان درصد قیر بهینه در این تحقیق به‌دست آمده است.

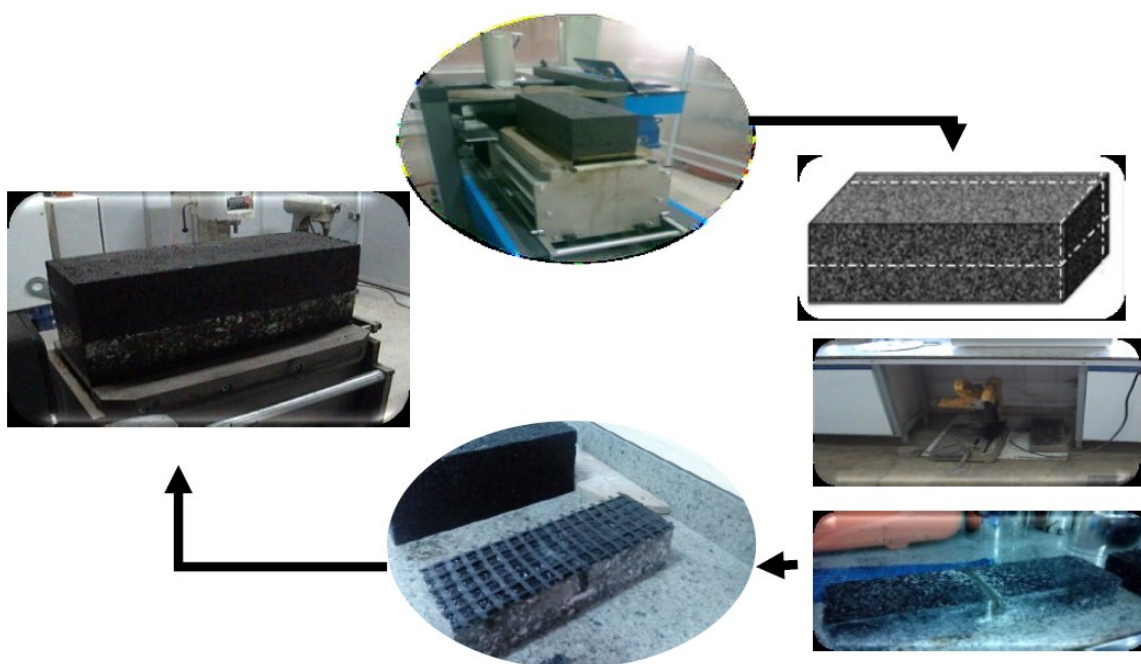
۲-۲. روش ساخت نمونه‌ها و آماده‌سازی آن‌ها برای آزمایش

برای ساخت و تراکم نمونه‌های آسفالتی از دستگاه پرس باکس^۱ با توجه به شرایط مورد نظر تعریف شده همچون تعداد سیکل بارگذاری، ارتفاع، تنش قائم، تنش برشی، درصد هوا، چگالی (وزن مخصوص) و دوره بارگذاری استفاده شد. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی روکش آسفالتی روی روسازی بتنی یا آسفالتی کهن، روکش‌های آسفالتی با استفاده از اندود سطحی (تک کت) روی

^۱ - Pressbox

در هنگام نصب ژئوسنتتیک‌ها، جهت خواب الیاف‌ها در جهت طول نمونه قرار گیرد تا از حداکثر کارایی کششی آن‌ها استفاده شده باشد. بعد از انجام مراحل گفته شده، لایه روکش با در نظر گرفتن مشکلات اجرایی و محدودیت دستگاه پرس باکس در شرایط ساخت نمونه و محدودیت‌های ارتفاعی، حجم مخلوط آسفالتی متناسب با ارتفاع ۸ سانتی‌متر ساخته و روی دال پایینی پخش شد.

طوری انتخاب گردد که در مقابل دمای مخلوط مقاومت کند. در این تحقیق، از قیر ۸۵-۱۰۰، تولید کارخانه پاسارگاد، به‌عنوان لایه اندود سطحی^۱ استفاده شد و پس از اجرای اندود سطحی، ژئوسنتتیک مورد نظر (دو نوع لایه ژئوکامپوزیتی "I" و "II" با مقاومت‌های کششی به‌ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ کیلونیوتن بر متر در دو جهت) با دقت لازم جهت اتصال کامل قیر به الیاف ژئوسنتتیک و لایه آسفالتی روی نمونه‌ها قرار گرفت. همچنین، توجه شد تا



شکل ۲. روش ساخت نمونه‌ها و آماده‌سازی آن‌ها برای آزمایش

شد. بارگذاری به‌صورت سیکلی نیم‌سینوسی^۴ با فرکانس ۲، ۶ و ۱۰ هرتز در نرم‌افزار Dynamic Creep Test V2.03 تعریف شده است. این نوع بارگذاری‌ها با چنین مشخصاتی به‌ترتیب برای شبیه‌سازی ترافیک با سرعت کم، متوسط و زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار حداکثر این بار برابر ۶/۹ kN معادل تنش فشاری ۶۹۰ kPa می‌باشد. در این تحقیق، آزمایش‌ها در سه دمای مختلف صفر، ۲۰ و ۴۰ درجه سلسیوس انجام گرفته است.

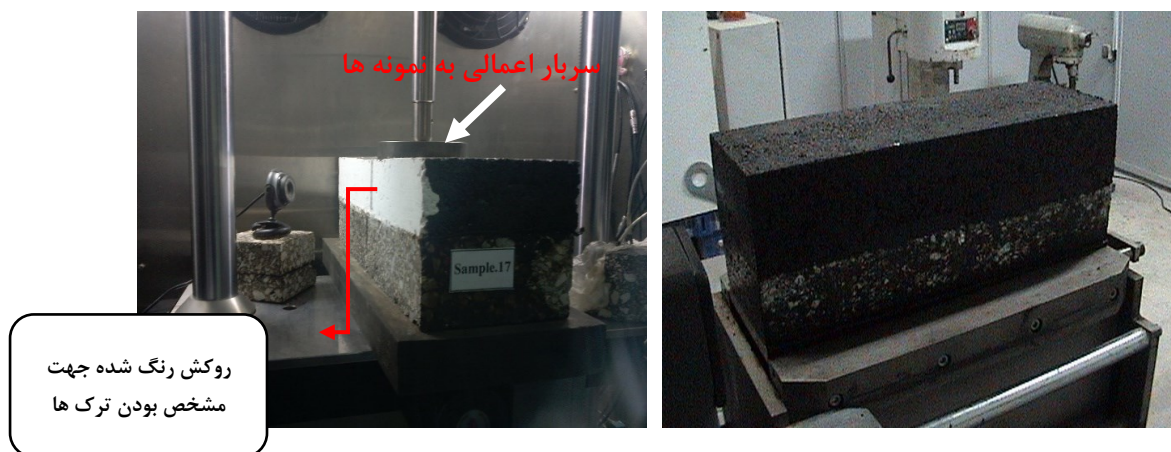
پس از ساخت نمونه‌ها، آن‌ها روی اساس لاستیکی از جنس نئوپرن^۲ با مدول الاستیسیته حدوداً ۱۱۰۰۰ KPa و سختی ۶/۴۵ MPa قرار داده شدند. استفاده از این نوع لاستیک یا نئوپرن برای شبیه‌سازی و مدل کردن اساس و بستر می‌باشد. شکل ۳، شماتیکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد که برای بارگذاری آماده شده‌اند. برای بارگذاری نمونه‌ها از دستگاه UTM-25^۳ استفاده شده است. همچنین، برای وارد کردن بار، از سرباری به ابعاد ۲۵H × ۱۰۰D، دقیقاً در روی ترک به‌صورت خطی استفاده

^۳- Universal Testing Machines

^۴- Haversy cyclic load

^۱- Tack coat

^۲- Neoprene rubber



شکل ۲. دال آسفالتی چندلایه ساخته شده تحت بارگذاری خستگی خمشی در دستگاه UTM-25

بارگذاری نشان از افزایش مقاومت آسفالت به دلیل تغییر در خصوصیات آن، در دمای کم (صفر درجه) دارد. با تحلیل شکل ۴، مشخص می‌شود که در نمونه‌های کنترلی، با افزایش فرکانس، از عمر خستگی کاسته می‌شود؛ به طوری که با افزایش فرکانس از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱۹ تا ۲۶ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کاسته شده است. همچنین، نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت II در برابر بیش از ۴۰۰,۰۰۰ سیکل بارگذاری تا لحظه گسیختگی از خود مقاومت نشان می‌دهند. البته بهبود عمر خستگی در نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت II نسبت به نمونه‌های کنترلی، کاملاً مشهود است. با تحلیل شکل ۴، مشخص می‌شود که افزایش فرکانس از عمر خستگی می‌کاهد؛ به طوری که با افزایش فرکانس از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۲۴ و ۳۸ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کاسته شده است.

۳. بررسی و تحلیل نتایج

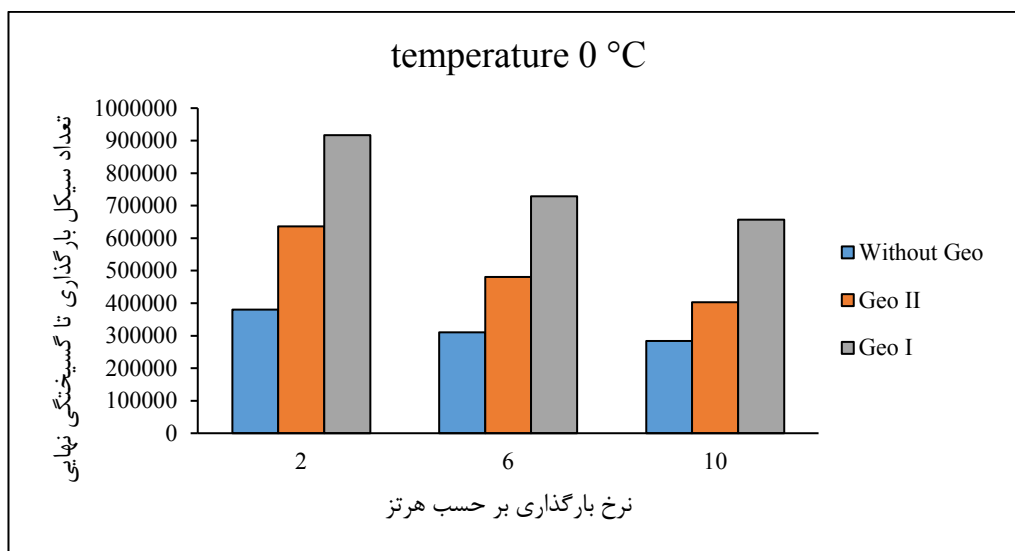
آزمایش‌ها روی نمونه‌های ساخته شده و بر اساس اصول شرح داده شده، انجام گردید که در ادامه، نتایج به دست آمده بررسی می‌گردد.

۳-۱. آزمایش نمونه‌های کنترلی، مسلح شده با

ژئوکامپوزیت، تحت سه دما

نمونه‌های کنترلی، همراه با ژئوکامپوزیت نوع I و نوع II در این گروه، در سه فرکانس متفاوت ۲، ۶ و ۱۰ هرتز، به صورت دولایه (ضخامت لایه پایینی ۷ سانتی‌متر و لایه بالایی ۵ سانتی‌متر) ساخته شده‌اند. لایه‌ی بالا و پایین با استفاده از فیر تک کت (به ترتیب به میزان ۰/۳، ۰/۹ و ۰/۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) به یکدیگر متصل شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تحمل نمونه‌های کنترلی در برابر بیش از ۲۵۰,۰۰۰ سیکل



شکل ۳. تعداد سیکل عمر خستگی در برابر نرخ بارگذاری برای نمونه‌های مسلح شده متفاوت در دمای صفر درجه سلسیوس

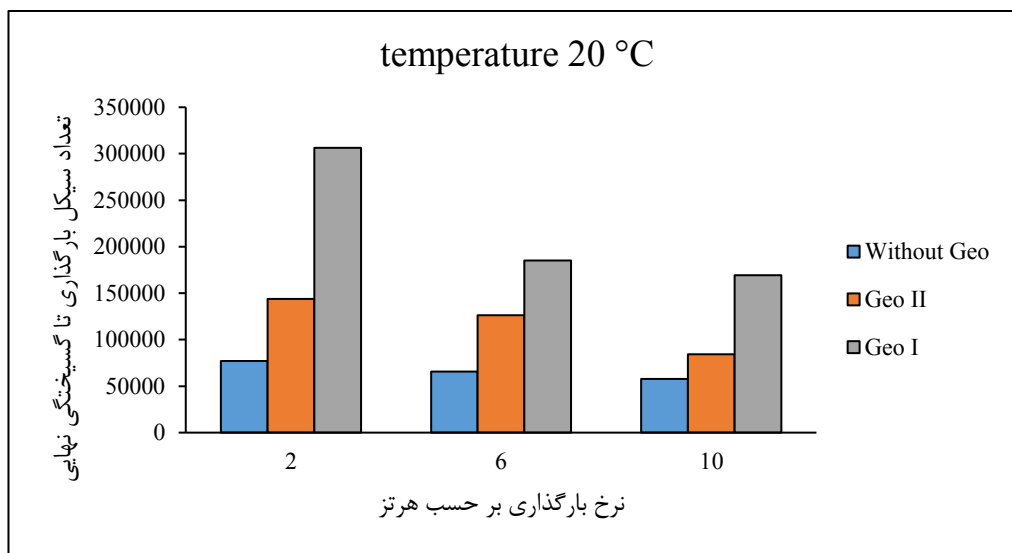
بر اساس مستندات ثبت شده، عمر خستگی نمونه‌های کنترلی در دمای ۲۰ درجه در فرکانس‌های ۲، ۶ و ۱۰ هرتز بین ۵۰,۰۰۰ تا ۸۰,۰۰۰ سیکل بارگذاری در مد خمشی می‌باشد. در مقایسه با همین نمونه‌ها در دمای صفر درجه، کاهش چشمگیری در عمر خستگی (بین ۷۵ تا ۸۰ درصد کاهش) ایجاد شده است. این کاهش در عمر خستگی برای رسیدن ترک به سطح روکش نشانگر تغییر در خواص آسفالت و قیر با افزایش دما صورت گرفته است. به عبارت دیگر، با افزایش دما، تغییراتی در قیر و آسفالت صورت می‌پذیرد که باعث کاهش چسبندگی قیر و مصالح و نرم‌شدگی در آسفالت می‌شود.

با تحلیل شکل ۵، مشخص می‌شود که با افزایش شدت نرخ بارگذاری (سنگین، متوسط و سبک)، زمان رسیدن ترک به سطح روکش کم می‌شود؛ به طوری که با جهش نرخ بارگذاری از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کاسته شده است. با توجه به مقادیر عمر خستگی در شکل ۵، تحمل نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت II در برابر بیش از ۸۰,۰۰۰ سیکل و نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت I در برابر بیش از ۱۵۰,۰۰۰ سیکل

از مقایسه نتایج می‌توان دریافت که عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت II در مقایسه با نمونه‌های مرجع کنترلی در فرکانس‌های ۲، ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱/۴ الی ۱/۷ برابر افزایش یافته است. تحلیل‌ها بیان می‌کنند که نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I در برابر بیش از ۶۰۰,۰۰۰ سیکل بار، در دمای صفر درجه، از خود مقاومت نشان می‌دهند. افزایش عمر خستگی در نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I نسبت به نمونه‌های کنترلی و مسلح با ژئوکامپوزیت II کاملاً مشخص است. همچنین، با افزایش فرکانس، از عمر خستگی کم می‌شود. به این صورت که با افزایش فرکانس از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز، به ترتیب حدود ۲۵ و ۳۲ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کاسته شده است. در مقایسه روند نتایج در شکل ۴ می‌توان دریافت که عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I در مقایسه با نمونه‌های مرجع کنترلی در فرکانس‌های متفاوت ۲، ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۲/۳۱ الی ۲/۵۴ برابر افزایش یافته است. این افزایش چندبرابری عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I در دمای صفر درجه نسبت به نمونه‌های کنترلی، تأثیر بسیار خوب این نوع میان‌لایه را در دماهای کم تأیید می‌کند.

زیرین) به ترتیب حدود ۱۲ و ۴۱ درصد از عمر خستگی نمونه‌های ژئوکامپوزیت II و حدود ۴۰ و ۴۵ درصد از عمر خستگی نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت I کاسته شده است.

بارگذاری نشان از تأثیر عملکرد مناسب ژئوکامپوزیت II و ژئوکامپوزیت I در بهبود عمر خستگی دال‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌های غیرمسلح دارد. با افزایش فرکانس از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز (افزایش شدت خرابی لایه

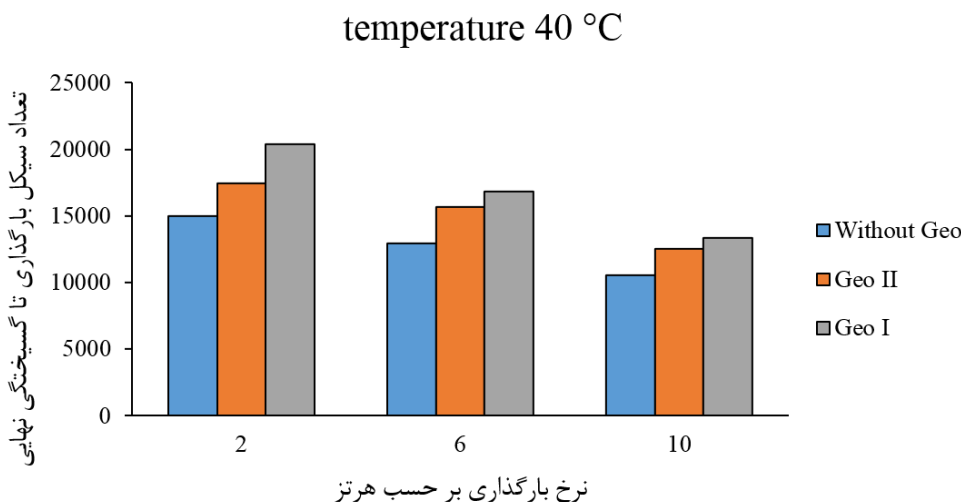


شکل ۴. تعداد سیکل عمر خستگی در برابر نرخ بارگذاری برای نمونه‌های مسلح شده متفاوت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس

نمونه‌ها در دمای صفر درجه و ۲۰ درجه سلسیوس، کاهش چشمگیری در عمر خستگی (حدود ۹۵ درصد کاهش نسبت به دمای صفر درجه و ۸۰ الی ۸۲ درصد کاهش نسبت به دمای ۲۰ درجه سلسیوس) ایجاد شده است. این کاهش چشمگیر در عمر خستگی برای رسیدن ترک به سطح روکش نشانگر تغییری است که در خواص آسفالت و قیر با افزایش دما صورت گرفته است. به عبارت دیگر، با افزایش دما، تغییراتی در قیر و آسفالت صورت می‌پذیرد که باعث کاهش چسبندگی قیر و مصالح و نرم‌شدگی در آسفالت می‌شود. علاوه بر این، با تحلیل نتایج شکل ۶، مشخص می‌شود که با افزایش نرخ بارگذاری، زمان رسیدن ترک به سطح روکش کم می‌شود؛ به طوری که با جهش نرخ بارگذاری از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۴۰ تا ۵۱ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کاسته شده است.

از مقایسه هیستوگرام‌های شکل ۵ می‌توان دریافت که عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت II و ژئوکامپوزیت I نسبت به نمونه‌های مرجع کنترلی در فرکانس‌های ۲، ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱/۵ الی ۱/۹۵ برابر و ۲/۸ الی ۴ برابر افزایش یافته است. این افزایش چندبرابری عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت II و ژئوکامپوزیت I در دمای ۲۰ درجه نسبت به نمونه‌های کنترلی، تأثیر بسیار خوب این نوع میان‌لایه‌ها را در این دما تأیید می‌کند. البته این تأثیر در دمای ۲۰ درجه نسبت به دمای صفر به ترتیب ۷ الی ۱۳ درصد و ۲۳ الی ۵۷ درصد افزایش داشت.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده، عمر خستگی نمونه‌های کنترلی در دمای ۴۰ درجه در فرکانس‌های ۲، ۶ و ۱۰ هرتز بین ۱۰,۰۰۰ تا ۱۵,۰۰۰ سیکل بارگذاری در مد خمش می‌باشد (شکل ۶). در مقایسه با همین



شکل ۶. تعداد سیکل عمر خستگی در برابر نرخ بارگذاری برای نمونه‌های مسلح شده متفاوت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس

درصد کاهش نسبت به دمای ۲۰ درجه سلسیوس ایجاد شده است. همچنین، بهبود عمر خستگی در نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت I نسبت به نمونه‌های کنترلی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، کاملاً محسوس می‌باشد. با تحلیل شکل ۶، مشخص می‌شود که با افزایش فرکانس (افزایش شدت خرابی سطح زیرین) از عمر خستگی کاسته می‌شود؛ به طوری که با افزایش نرخ بارگذاری از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱۷ الی ۳۵ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کاسته شده است. علاوه بر آن، عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I در مقایسه نمونه‌های مرجع کنترلی با فرکانس‌های ۲، ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱/۲۶ الی ۱/۳۶ برابر افزایش یافته است. این افزایش چندبرابری عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I در دمای ۴۰ درجه نسبت به نمونه‌های کنترلی، تأثیر بسیار خوب این نوع میان‌لایه را تأیید می‌کند. البته نکته جالب در آن است که عمر خستگی در نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در مقایسه با دماهای صفر و ۲۰ درجه سلسیوس، با افت زیادی روبرو شده است؛ به طوری که به ترتیب کاهشی حدود ۹۴ درصد نسبت به دمای صفر درجه و ۹۳ درصد نسبت به دمای ۲۰ درجه سلسیوس ایجاد شده است. این کاهش چشمگیر در عمر

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، تحمل نمونه‌های همراه با ژئوکامپوزیت II و ژئوکامپوزیت I به ترتیب در برابر کمتر از ۲۰,۰۰۰ و ۲۵,۰۰۰ سیکل بارگذاری، نشان از کاهش مقاومت آسفالت و کاهش چسبندگی میان‌لایه و روکش، به دلیل تغییر در خصوصیات قیر و آسفالت در اثر افزایش دما، دارد. البته بهبود عمر خستگی در نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I و همراه با ژئوکامپوزیت II، نسبت به نمونه‌های کنترلی، کاملاً مشهود است. با تحلیل شکل ۶، مشخص می‌شود که با افزایش فرکانس، از عمر خستگی کم می‌شود؛ به طوری که با افزایش نرخ بارگذاری از ۲ هرتز به ۶ و ۱۰ هرتز به ترتیب حدود ۱۱ تا ۲۹ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها کم شده است. همچنین، می‌توان دریافت که عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت II، تست شده در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، در مقایسه با نمونه‌های مرجع کنترلی، در فرکانس‌های ۲، ۶ و ۱۰ هرتز حدود ۱/۱۷ الی ۱/۲ برابر افزایش یافته است. نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت II در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، در مقایسه با دماهای صفر و ۲۰ درجه سلسیوس، با افت چشمگیری در عمر خستگی روبرو شده‌اند. به طوری که به ترتیب حدود ۹۵ درصد کاهش نسبت به دمای صفر درجه و ۸۵ الی ۸۷

که N_f^{NT} عمر خستگی نمونه غیرمسلح و N_f^{th} عمر خستگی نمونه مسلح است.

با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌شود که بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت I در دمای ۲۰ درجه و با فرکانس ۲ هرتز می‌باشد که تا سه برابر باعث بهبود وضعیت و مقاومت سیستم مورد بررسی نسبت به نمونه‌های مرجع گشته است. بعد از آن، به ترتیب نمونه‌های مسلح با ژئوکامپوزیت I در دمای صفر، ۲۰ و ۴۰ درجه بهتر از ژئوکامپوزیت II عمل کرده‌اند. همچنین، با توجه به نمودارها می‌توان بیان کرد که با افزایش نرخ بارگذاری، تأثیر میان‌لایه‌های استفاده شده در تمامی شرایط دمایی رو به کاهش می‌گذارد. البته بهبود وضعیت در نمونه‌های ژئوکامپوزیت II هم قابل تأمل می‌باشد.

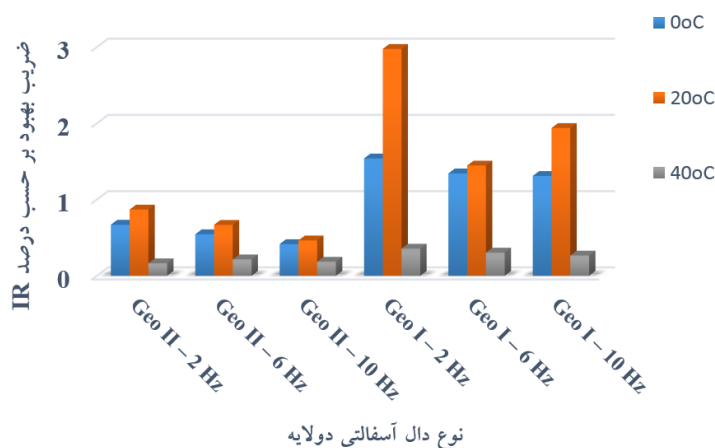
خستگی، چه در نمونه‌های همراه با ژئوکامپوزیت II و چه در نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت I، برای رسیدن ترک به سطح روکش، نشانگر تغییر در خواص آسفالت و قیر و در نتیجه کاهش عملکرد ژئوکامپوزیت I در اثر کاهش چسبندگی روکش به آن‌ها در برابر افزایش دما صورت گرفته است.

۲-۳. بررسی عملکرد نمونه‌های تقویت شده، در

دماهای مختلف، با استفاده از شاخص بهبود

در این تحقیق، به منظور بررسی عملکرد ژئوکامپوزیت II و ژئوکامپوزیت I مصرفی در دال‌های آسفالتی و مقایسه عملکرد آنها با هم، نسبت به نمونه‌های مرجع، از پارامتر دیگری به نام شاخص بهبود^۱ (IR) استفاده شده است که به صورت درصد بیان می‌گردد:

$$IR = \frac{N_f^{th} - N_f^{NT}}{N_f^{NT}} \times 100 \quad (1)$$



شکل ۷. شاخص بهبود نمونه مسلح در برابر نمونه‌های کنترلی

مستقل شامل دما (T=A)، فرکانس (F=B) و نوع میان‌لایه (G=C) نسبت به عمر روکش آسفالتی ارزیابی شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده از جدول خروجی تحلیل واریانس (شامل: DF, degrees of freedom; SS, sum of squares; MS, mean square, P-values, R²) که به جدول داده‌های نتایج حاصل از تجزیه آماری معروف می‌باشد، برازش مدل صورت گرفت. با توجه به داده‌های به دست آمده از تحلیل

۳-۳. آنالیز آماری و ارائه مدل‌های رگرسیونی

پاسخ‌های مورد مطالعه از داده‌های به دست آمده

پس از اتمام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار design expert و از قسمت historical data روش طرح پاسخ برای ارائه مدل‌های پیش‌بینی پاسخ مورد بررسی (عمر خستگی) در این تحقیق انجام گرفت. در این مطالعه، اثر متغیرهای

¹ - Improvement index

values برای آزمون عدم برازش در تمامی سطوح مورد اندازه گیری معنی دار نبوده است ($P > 0.1$). این مسئله نشان می دهد که مدل ارائه شده به خوبی روند داده ها را نشان می دهد. با توجه به جدول مدل پیش بینی و مقادیر P-values به دست آمده، تمامی متغیرها تا سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار بوده اند. در رابطه ۲، مدل به دست آمده به صورت کد بندی شده مشاهده می شود:

واریانس در جدول ۴ برای تمامی پاسخ های مورد نظر تحقیق می توان صحت مدل های مورد بررسی را با استفاده از ضریب تبیین^۱ (R^2) و آزمون عدم برازش^۲ مشخص نمود. همچنین، مقدار P-values به دست آمده برای رگرسیون چند جمله ای درجه دوم ($P < 0.05$) برای تمامی مدل ها، نشان می دهد که مدل های درجه دوم از نظر آماری معنی دار می باشند؛ به دلیل اینکه مقادیر P-

$$\text{Cycles} = +1.350E + 05 - 2.590E + 05 \times A - 45724.28 \times B - 92738.04 \times C [1] - 14435.15 \times C [2] \quad (2)$$

$$+ 47840.58 \times AB + 1.028E + 05 \times AC [1] + 13488.83 AC [2] + 1.390E + 05 \times A^2$$

جدول ۴. چگونگی کد بندی متغیرهای مورد بررسی در نرم افزار design expert

Temperature = A		
Levels	-1	1
temperature	0	40
Frequency = B		
Levels	-1	1
Frequency	2	10
Type of geosynthetic = C		
Levels	C[1]	C[2]
GOE I	-1	-1
GOE II	0	1
Without GEO	1	0

بر اساس جدول ۵، مشاهده می شود که مقدار R^2 و Adjusted R^2 به ترتیب برابر ۰/۹۸۷ و ۰/۹۸۱ می باشد که نشان دهنده دقت خوب مدل ارائه شده می باشد.

جدول ۵. تحلیل ANOVA برای متغیر پاسخ

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F - value	P - value	Significant or insignificant
Model	1.72E+12	8	2.15E+11	170.99	< 0.0001	significant
A-T	1.21E+12	1	1.21E+12	962.23	< 0.0001	significant
B-F	3.76E+10	1	3.76E+10	29.98	< 0.0001	significant
C-G	1.83E+11	2	9.13E+10	72.75	< 0.0001	significant
AB	2.75E+10	1	2.75E+10	21.88	0.0002	significant
AC	1.46E+11	2	7.28E+10	58.01	< 0.0001	significant
A ²	1.16E+11	1	1.16E+11	92.31	< 0.0001	significant
Residual	2.26E+10	18	1.26E+09			
Cor Total	1.74E+12	26				
R ²			0.987			
Adjusted R ²			0.981			

² - Lack of fitness

¹ - Coefficient of determination

بررسی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس بهتر از سایر دماها می‌باشد.

- تحلیل‌ها افزایش میزان عمر خستگی در نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در دمای صفر درجه به علت تغییر در خصوصیات لایه آسفالتی (افزایش مدول لایه‌های آسفالتی) را نشان می‌دهند. تحمل نمونه‌های کنترلی در برابر بیش از ۲۵۰,۰۰۰ سیکل بارگذاری نشان از افزایش این مقاومت به دلیل تغییر در خصوصیات آن، در دماهای کم (صفر درجه) دارد.

- اثرپذیری بیشتر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در کنترل ترک‌های انعکاسی نسبت به دما در برابر پارامترهای دیگر مورد بررسی در نتایج کاملاً واضح می‌باشد. مثلاً کاهش دما از ۴۰ درجه سلسیوس به صفر درجه بیشترین تأثیر را بر افزایش چندبرابری عمر خستگی خواهد داشت.

- بعد از دما، به ترتیب نوع ژئوسنتتیک مصرفی و سپس نرخ بارگذاری بیشترین تأثیر را بر تغییرات عمر خستگی (حدود ۵۳۰۰۰ سیکل بارگذاری اختلاف بین دمای ۴۰ و صفر درجه) باقی خواهند گذاشت.

- کاهش محسوس عملکرد نمونه‌ها در فرکانس‌های بیش از ۶ هرتز (ترافیک با سرعت‌های متوسط به زیاد) چه در نمونه‌های مسلح و چه در نمونه‌های غیرمسلح دیده می‌شود.

- در مدل پیش‌بینی عمر خستگی و مقادیر P-values به‌دست آمده، تمامی متغیرها تا سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده‌اند.

- بر اساس نتایج آنالیز واریانس از مدل عمر خستگی به‌دست آمده در این پژوهش، مقدار R^2 و Adjusted R^2 به ترتیب برابر ۰/۹۸۷ و ۰/۹۸۱ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت زیاد مدل ارائه شده است.

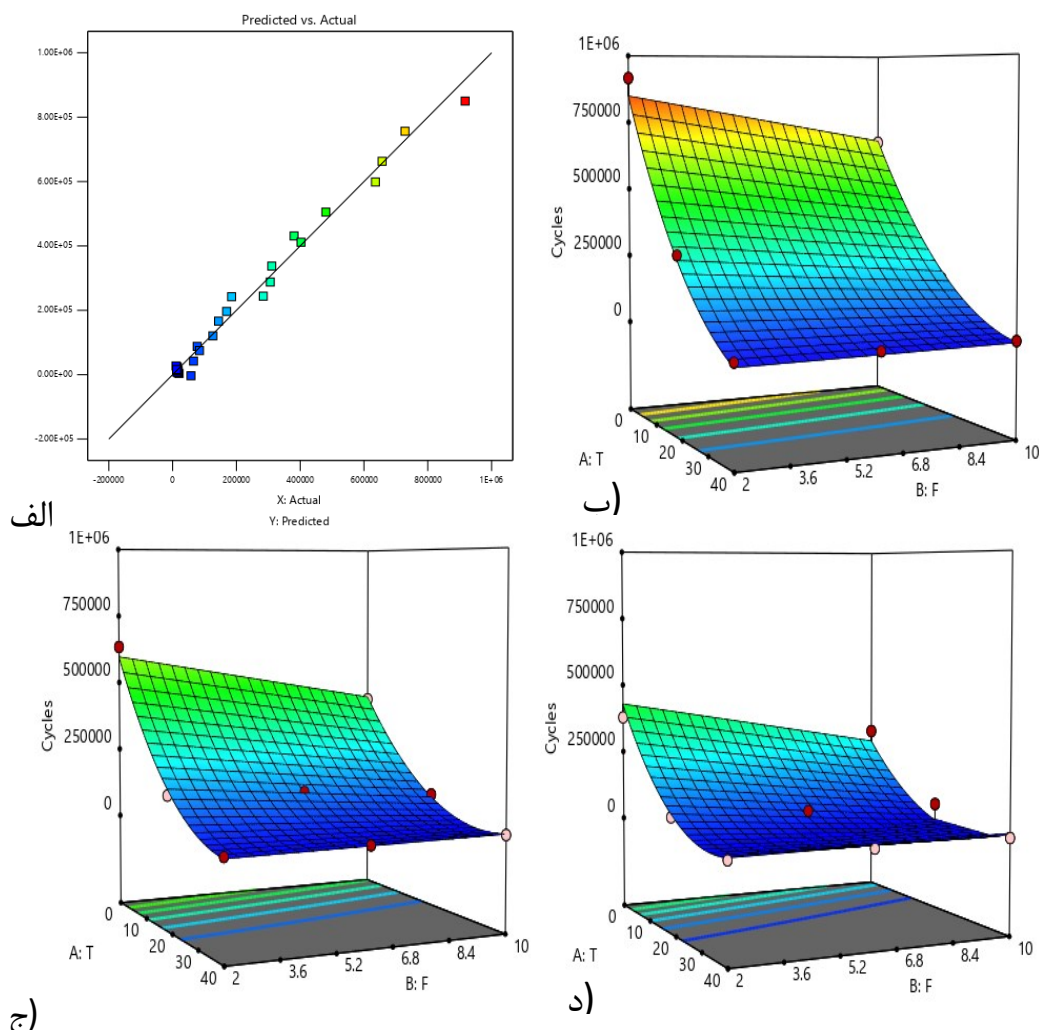
در شکل‌های ۸-ب، ۸-ج و ۸-د مقدار تأثیر هر یک از پارامترهای مستقل دما و فرکانس بارگذاری را می‌توان بر نتایج عمر خستگی برای هر سه حالت در نظر گرفته شده (مسلح شده با ژئوکامپوزیت I، مسلح شده با ژئوکامپوزیت II و مسلح نشده) مشاهده کرد. با توجه به شکل ۸-ب، کاهش دما و کاهش فرکانس بارگذاری و استفاده از ژئوکامپوزیت I بیشترین تأثیر را بر افزایش عمر خستگی در نمونه‌های دال آسفالتی ایجاد می‌کند. البته با مقایسه شکل‌ها مشخص می‌شود که کاهش دما از ۴۰ درجه سلسیوس به صفر درجه بیشترین تأثیر را بر افزایش چندبرابری عمر خستگی خواهد داشت. بعد از دما، به ترتیب نوع ژئوسنتتیک مصرفی و سپس نرخ بارگذاری بیشترین تأثیر را بر تغییرات عمر خستگی (حدود ۵۳,۰۰۰ سیکل بارگذاری اختلاف بین دمای ۴۰ و صفر درجه) خواهند داشت. به بیان دیگر، دمای صفر، کاهش فرکانس تا ۲ هرتز و استفاده از ژئوکامپوزیت I بیشترین تأثیر را بر افزایش عمر خستگی خواهد گذاشت.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

- نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت نوع I نسبت به ژئوکامپوزیت نوع II و نمونه‌های کنترلی در افزایش عمر خستگی در تمام شدت‌های بارگذاری و دماهای آزمایش، عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. به عبارت دیگر، افزایش مقاومت کششی نمونه‌های ژئوسنتتیک تأثیر مستقیم بر افزایش پاسخ‌های مورد بررسی و کاهش تمرکز تنش در نواحی ترک داشته است.

- نتایج نشان می‌دهد که عملکرد میان‌لایه‌های ژئوکامپوزیتی در برابر ظهور ترک‌های انعکاسی مورد



شکل ۸. الف) نتایج مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی عمر خستگی، ب) تغییرات عمر خستگی در برابر تغییرات دما و فرکانس بارگذاری برای حالت مسلح شده با ژئوکامپوزیت I، ج) تغییرات عمر خستگی در برابر تغییرات دما و فرکانس بارگذاری برای حالت مسلح شده با ژئوکامپوزیت II، د) تغییرات عمر خستگی در برابر تغییرات دما و فرکانس بارگذاری برای حالت مسلح نشده.

۵. مراجع

- خدادادی، ا.، امیری حسینی، ح. ر. و فخری، م. ۱۳۸۴. "اثر ژئوستتیک‌ها بر عمر خستگی روسازی‌های آسفالتی". پژوهشنامه حمل و نقل، ۲(۲): ۱۳۷-۱۳۰.
- کی‌منش، م. و اسلامی، م. ۱۳۹۲. "بررسی نقش و تأثیر ژئوستتیک‌ها در کنترل ترک‌های انعکاسی رویه آسفالتی". کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری.
- مطالعه آزمایشگاهی روش‌های بهبود خصوصیات کششی مخلوط‌های آسفالتی و تأثیر آن بر روی ترک‌های انعکاسی. ۱۳۸۵. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Canestrari, F. and Ingrassia, L. P. 2020. "A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges". *J. Traffic Transport. Eng.*, 7(5): 541-572.
- Deilami, S. and White, G. 2020. "Review of reflective cracking in composite pavements". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 13(5): 524-535.
- Fallah, S. and Khodaii, A. 2015. "Reinforcing overlay to reduce reflection cracking: An experimental investigation". *Geotext. Geomembranes* 43(3): 216-227.
- Ferrotti, G., Canestrari, F., Pasquini, E. and Virgili, A. 2012. "Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements". *Geotext. Geomembranes*, 34: 11-18.
- Ingrassia, L. P., Virgili, A. and Canestrari, F. 2020. "Effect of geocomposite reinforcement on the performance of thin asphalt pavements: Accelerated pavement testing and laboratory analysis". *Case Stud. Constr. Mater.*, 12: e00342.
- Jaeklin, F. and Scherer, J. 1996. "Asphalt reinforcing using glass fibre grid, "Glasphalt". Third International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, Maastricht, The Netherlands.
- Khodaii, A., Fallah, S. and Moghadas Nejad, F. 2009. "Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays". *Geotext. Geomembranes*, 27(1): 1-8.
- Kim, Y. R., Little, D. and Lytton, R. 2003. "Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 15(1): 75-83.
- Leiva-Padilla, P., Blanc, J., Salgado, A., Hammoum, F. and Hornych, P. 2022. "Fatigue life predictions for a European pavement test section subjected to individual and Platoon truck configurations". *Transport. Res. Record*, 2676(4): 746-762.
- Lv, S., Xia, C., Liu, C., Zheng, J. and Zhang, F. 2019. "Fatigue equation for asphalt mixture under low temperature and low loading frequency conditions". *Constr. Build. Mater.*, 211: 1085-1093.
- Lytton, R. L. 1989. "Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete". *Geotext. Geomembranes*, 8(3): 217-237.
- Medani, T. and Molenaar, A. 2000. "Estimation of fatigue characteristics of asphaltic mixes using simple tests". *Heron*, 45(3): 155-166.
- Moghadas Nejad, F., Noory, A., Toolabi, S. and Fallah, S. 2015. "Effect of using geosynthetics on reflective crack prevention". *Int. J. Pavement Eng.*, 16(6): 477-487.
- Moghadas Nejad, F., Asadi, S., Fallah, S. and Vadood, M. 2016. "Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon". *Geotext. Geomembranes*, 44(2): 178-187.
- Nair, H. and Habbouche, J. 2020. "Installation and initial evaluation of paving fabric interlayers for mitigating reflective cracking in pavements". *Virginia Transport. Res. Council (VTRC)*.
- Nguyen, M. L., Blanc, J., Kerzr ho, J. P. and Hornych, P. 2013. "Review of glass fibre grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR". *Road Mater. Pavement Des.*, 14(S1): 287-308.
- Noory, A., Moghadas Nejad, F. and Khodaii, A. 2019. "Evaluation of the effective parameters on shear resistance of interface in a geocomposite-reinforced pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(9): 1106-1117.
- Ogundipe, O. M., Thom, N. and Collop, A. 2013. "Investigation of crack resistance potential of stress absorbing membrane interlayers (SAMIs) under traffic loading". *Constr. Build. Mater.*, 38: 658-666.
- Pasquini, E., Bocci, M. and Canestrari, F. 2014. "Laboratory characterisation of optimised geocomposites for asphalt pavement reinforcement". *Geosynth. Int.*, 21(1): 24-36.
- Ramsamooj, D. V. 2001. "An innovative technique for using polymer composites in airport pavement rehabilitation". *Composites Part B: Eng.*, 32(1): 57-66.
- Saride, S. and Kumar, V. V. 2017. "Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements". *Geotext. Geomembranes*, 45(3): 184-196.
- Shafabakhsh, G., Akbari, M. and Bahrami, H. 2020. "Evaluating the fatigue resistance of the innovative modified-reinforced composite asphalt mixture". *Adv. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1155/2020/8845647>
- Shen, S. and Carpenter, S. 2007. "Development of an asphalt fatigue model based on energy principles". *Asphalt Paving Technol.-Proc.*, 76: 525.
- Sobhan, K. and Tandon, V. 2008. "Mitigating reflection cracking in asphalt overlays using geosynthetic reinforcements". *Road Mater. Pavement Des.*, 9(3): 367-387.
- Suresh, S. 1998. "Fatigue of materials". Cambridge University Press.
- Van Dijk, W. and Visser, W. 1977. "Energy approach to fatigue for pavement design". *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.*
- Vanelstraete, A. and Francken, L. 1993. "Numerical modelling of crack initiation under thermal stresses and traffic loads". *Proceedings of the Second International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, State of the Art and Design Recommendations*, Liege, Belgium.

- Yang, L. 2018. "A study on geosynthetic-reinforced asphalt systems". Thesis, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, USA.
- Zamora-Barraza, D., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D. and Vega-Zamanillo, A. 2011. "Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone". *Geotext. Geomembranes* 29(2): 130-136.
- Zhang, J., Wang, Y. D. and Su, Y. 2019. "Fatigue damage evolution model of asphalt mixture considering influence of loading frequency". *Constr. Build. Mater.*, 218: 712-720.