

ارزیابی تأثیر الیاف شیشه بر عمر خستگی رویه‌های آسفالتی

حامد خانی سانجیح*، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید فرزین فائزی، گروه علمی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Khani@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۵ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵

چکیده

استفاده از ژئوتکستایل‌ها یکی از راهکارهای به تأخیر انداختن ترک‌های انعکاسی است. در چند دهه اخیر متخصصان به این نتیجه رسیده‌اند که با استفاده از الیاف مقاوم مانند الیاف شیشه می‌توان کارایی ژئوتکستایل‌ها را افزایش داد. در این تحقیق با اجرای آزمایش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای به بررسی تأثیر ژئوتکستایل‌های مسلح به الیاف شیشه بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی پرداخته شده است. سه نوع ژئوتکستایل در این تحقیق استفاده شده است که نوع پارچه آنها یکسان بود و در دو سطح به الیاف شیشه مسلح شده بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در کرنش‌های زیاد، الیاف شیشه کارایی کمتری دارند، ولی در کرنش کم مؤثرترند. بنابراین برای جاده‌های با ترافیک زیاد استفاده از ژئوتکستایل‌های مسلح به الیاف شیشه از کارایی بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای، عمر خستگی، الیاف شیشه، ژئوتکستایل

۱- مقدمه

در این مصالح می‌توان از الیاف مقاوم استفاده کرد. که الیاف شیشه و کربن دو نوع اصلی این الیاف‌اند. خصوصیت اصلی الیاف مورد استفاده در ژئوتکستایل این است که در حداقل کرنش به حداکثر تنش خود می‌رسند. این خصوصیت سبب می‌شود که از تمرکز تنش و انعکاس ترک به لایه‌های بالایی جلوگیری شود.

تنوع ژئوتکستایل‌ها و الیاف تولیدی شرکت‌های مختلف و شرایط اقلیمی مناطق مورد بررسی کارامدی این محصولات را با ابهام مواجه کرده است. نوع الیاف تا حد زیادی بر عملکرد ژئوتکستایل‌ها مؤثر است و تأثیر استفاده از آنها در افزایش عمر آسفالت باید بررسی شود (Hosseini et al., 2009).

سهر و جاکلین در یک تحقیق آزمایشگاهی تأثیر مسلح کردن آسفالت با ژئوگریدهای مسلح به الیاف شیشه را بررسی کردند. در این تحقیق بارگذاری دینامیکی به صورت بارگذاری چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌هایی به ابعاد ۹۰ در ۱۸۰ در ۶۰۰ میلی‌متر اعمال شد. حداکثر نیرو در این آزمایش ۴/۵ کیلونیوتن

ژئوستتیک‌ها گروهی از مواد پلیمری‌اند که مصرف روزافزونی در پروژه‌های مهندسی از جمله راه و فرودگاه دارند. مطالعات نشان داده است که کاربرد ژئوستتیک‌ها می‌تواند به‌نحو مؤثری از بروز و گسترش ترک‌ها در روسازی جلوگیری کند.

ژئوستتیک‌ها به پنج گروه عمومی ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها، ژئونت‌ها، ژئوممبرن‌ها و ژئوکامبوزیت‌ها تقسیم می‌شوند. این مصالح مقاومت کششی خوبی دارند و می‌توانند به‌نحو مؤثری در مسلح کردن مصالحی که در کشش ضعیف‌اند به‌کار روند. کاربرد لایه‌های ژئوستتیکی در خاک و آسفالت که در کشش ضعیف‌اند می‌تواند مشکل مقاومت کششی را در آنها حل کند. لایه‌های خاکی و آسفالتی مسلح‌شده ظرفیت باربری و مقاومت کششی بیشتری نسبت به لایه‌های غیرمسلح دارند (Botton and Lytton, 2003; Chang et al., 1999).

برای افزایش کارایی ژئوتکستایل تدابیر مختلفی اندیشیده شده است. برای کاهش تغییر مکان و افزایش انرژی جذب‌شده

فازی به صورت کمی از عدد یک (سالم) تا عدد صفر (خراب) بیان می‌شود.

مطابق مفاهیم مکانیک شکست خرابی داخلی یک جسم براساس کاهش سطح مؤثر ناشی از یک بارگذاری چندمحوری تعریف می‌شود. این مفهوم را در قالب رابطه ۱ می‌توان بیان کرد (Rongzong and Harvay, 2003).

$$D = \frac{A_D}{A} \quad (1)$$

که:

$$A_D = \text{سطح ترک خورده؛}$$

$$A = \text{سطح کل؛}$$

مقدار متغیر D از صفر تا یک در تغییر است.

لمیتر متوجه شد که معادله بالا را در مورد مصالح روسازی می‌توان با استفاده از مدول الاستیسیته یانگ به کار برد؛ بنابراین رابطه ۱ به شکل به رابطه ۲ در می‌آید.

$$D = \frac{S - S_e}{S} \quad (2)$$

که S_e مدول سختی مؤثر و S مدول کامل مصالح است.

چنانچه فرض شود خرابی به صورت تدریجی و با افزایش تعداد بارگذاری اتفاق می‌افتد، نرخ رشد خرابی در برابر تعداد بارگذاری به متغیرهای بحرانی که شامل خصوصیات مصالح و شرایط آزمایش می‌شوند وابسته است. این مفهوم را می‌توان در قالب رابطه ۳ نشان داد.

$$\frac{d_D}{d_N} = f(\sigma, \epsilon, T, \dots) \quad (3)$$

که در آن σ تنش، ϵ کرنش و T دمای جسم است. با استفاده از داده‌های آزمایش خستگی، تابع f را در حالت یک‌بعدی می‌توان نوشت.

اگر داده‌های $\frac{d_D}{d_N}$ در برابر کرنش اولیه در مقیاس لگاریتمی رسم شود خط راستی را با رابطه ۴ می‌توان بر آنها برازش داد.

$$\frac{d_D}{d_N} = B \epsilon_o^m \quad (4)$$

که در آن ϵ_o کرنش اولیه؛ و B ، m اعداد ثابتی‌اند که به مشخصات مصالح آسفالتی وابسته‌اند (Hosseini et al., 2009).

با فرکانس ۲۹/۳ هرتز و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد بود. شبکه ژئوستتیک در این آزمایش در فاصله ۳۰ میلی‌متر از ته نمونه قرار داده شد. این آزمایش با ژئوگریدهای مسلح به الیاف شیشه با پلی‌پروپیلین بافته‌نشده، ژئوگرید پلی‌استر و ژئوتکتایل پلی‌پروپیلین بافته‌نشده انجام گرفت. این نتایج نشان داد با کاربرد مصالح ژئوستتیک مذکور عمر روسازی هفت تا هشت برابر افزایش می‌یابد (Seherer and Jaecklin, 1996).

صرف در یک تحقیق آزمایشگاهی اثر مسلح کردن با ژئوتکتایل‌ها بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی را بررسی کرد. نتایج تحقیقات صرف نشان داد که عمر خستگی آسفالت مسلح‌شده تا حد زیادی افزایش می‌یابد و ژئوتکتایل‌ها تأثیر زیادی در افزایش عمر نمونه آسفالتی دارند (Saraf et al., 2001). کیم بر روی چند نمونه مسلح به ژئوتکتایل آزمایش خستگی به‌روشنی چهار نقطه‌ای انجام داد. ژئوتکتایل‌های به‌کاررفته در این تحقیق نیز به الیاف شیشه و کربن مسلح شده بودند. وی طی این تحقیق به این نتیجه رسید که الیاف کربن افزایش زیادی در انرژی شکست و بیشینه بار وارد بر نمونه‌های آسفالتی ایجاد می‌کنند. الیاف شیشه در این تحقیق سبب ارتقای عملکرد سازه‌ای نمونه‌های آسفالتی شدند، ولی تأثیر چندانی در افزایش حداکثر بار وارد بر نمونه‌ها نداشتند (Lee and Kim, 2011).

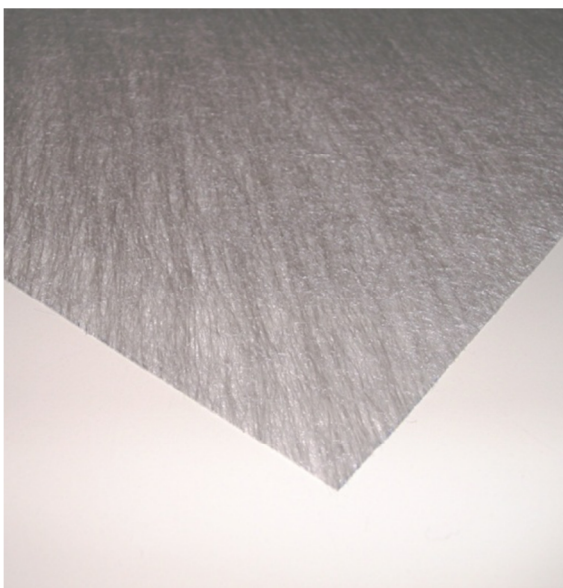
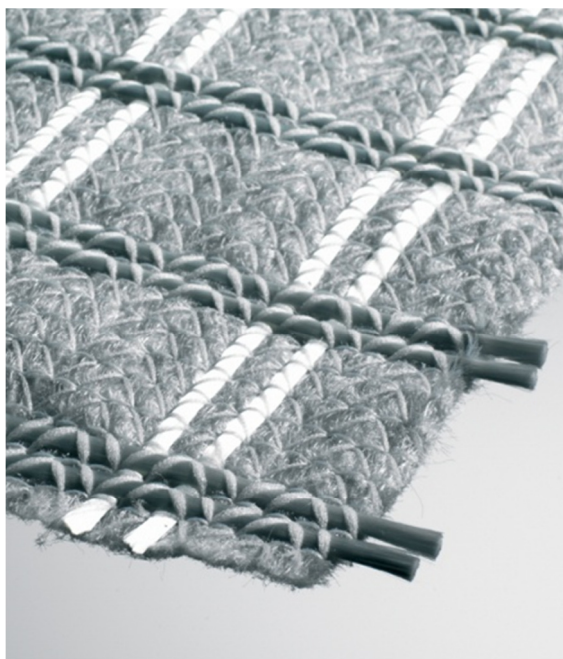
تئوری ترک

خستگی در آسفالت به‌طور معمول به دو مرحله شروع ترک و پخش ترک تقسیم می‌شود. شروع ترک به مرحله ایجاد ترک گفته می‌شود و پخش ترک شامل مرحله رشد ترک‌های ریز در بدنه روسازی است.

نتایج شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی و مطالعات میدانی در مقیاس واقعی مشخص می‌کند که با وارد شدن بارهای تکراری به مصالح آسفالتی مدول سختی مصالح آسفالتی بدون به‌وجود آمدن ترک‌های قابل مشاهده کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که خرابی در مصالح، پدیده‌ای تدریجی است که با افزایش تکرار بارگذاری و گذشت زمان اتفاق می‌افتد (Mahrez and Karim, 2010).

روش مکانیک شکست برای تحلیل خرابی‌های منجر به ترک‌خوردگی بر اثر بارگذاری در دهه ۱۹۶۰ بنیان‌گذاری شد. حالت ماده برای رسیدن به خرابی در این علم براساس منطق

استاندارد AASHTO-M288 شامل وزن واحد سطح، نقطه ذوب، مقاومت کششی در دو جهت طولی و عرضی، بر روی این محصولات انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. نوع الیاف به‌کاررفته برای مسلح کردن ژئوتکستایل‌ها شامل الیاف شیشه و کربن است که مشخصات مکانیکی آنها شامل مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و حد نهایی کرنش در حالت اندود با قیر در جدول ۵ درج شده است. در این تحقیق از الیاف شیشه استفاده شده است و جنس ژئوتکستایل‌ها نیز از پلی‌استر است.



شکل ۱. نمونه‌های ژئوتکستایل PGM-14 و PGM 50-50

برای بررسی عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی روش‌های مختلفی از جمله کشش غیرمستقیم، کشش مستقیم و تیرچه خمشی وجود دارند. به‌علت کارایی بیشتر در تحلیل‌های علمی در این تحقیق از روش تیرچه خمشی استفاده شده است. در این تحقیق، حد کارایی الیاف شیشه در مسلح کردن ژئوتکستایل‌ها و تأثیر آن بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بررسی شده است و هدف، ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی ژئوتکستایل حاوی الیاف شیشه در روسازی‌های آسفالتی است.

۲- روش تحقیق

برای ارزیابی تأثیر ژئوتکستایل‌های مسلح به الیاف شیشه در افزایش عمر خستگی سه نوع ژئوتکستایل ساخت شرکت پلی‌فلت که در ایران کاربرد گسترده‌ای داشتند ارزیابی شدند. محل قرارگیری ژئوتکستایل در زیرنمونه آسفالتی، ضخامت نمونه‌ها و نوع آسفالت به گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین تطابق را با شرایط میدانی داخل کشور داشته باشند. به‌طور معمول این نوع ژئوتکستایل‌ها برای جلوگیری از بروز ترک‌های انعکاسی در زیر لایه روکش اجرا می‌شوند که این روکش ۴ تا ۶ سانتی‌متر ضخامت دارد.

۲-۱- خصوصیات مصالح

دانه‌بندی مصالح سنگی و خصوصیات قیر به‌کاررفته در این تحقیق به‌ترتیب مطابق مندرجات جدول‌های ۱ و ۲ است. نوع قیر استفاده‌شده، قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان است که براساس آزمایش‌ها مشخصات عملکردی آن PG 64-22 است. مشخصات آسفالت به‌کاررفته نیز مطابق مندرجات جدول ۳ است. این آسفالت بیشترین کاربرد را در ایران دارد.

ژئوتکستایل‌های استفاده‌شده در این تحقیق محصولات PGM 100-100، PGM 50-50، PGM-14 ساخت شرکت پلی‌فلت هستند. پارچه موجود در این سه نوع ژئوتکستایل یکسان است، ولی محصول PGM 50-50 به یک ردیف الیاف شیشه و محصول PGM 100-100 به دو ردیف الیاف شیشه مسلح است. این سه نوع محصول چون کاربرد اجرایی بیشتری در ایران داشتند برای اجرای این تحقیق انتخاب شدند. نمونه‌های ژئوتکستایل PGM-14، PGM 50-50 در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. آزمایش‌های مصالح ژئوتکستایل مطابق با

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی برای آسفالت

۰/۷۵	۰/۱۵۰	۲/۳۶	۴/۷۵	۱۲/۵	۱۹	اندازه الک بر حسب میلی متر
۷	۱۰		۵۹	۹۵	۱۰۰	مقدار عبوری بر حسب درصد
۲-۱۰	۷-۳۳	۲۸-۵۸	۴۴-۷۴	۱۰۰-۹۰	۱۰۰	محدوده عبوری براساس جدول ۲-۳ نشریه ۱۰۱

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده

مقدار	استاندارد	واحد	مشخصات
۱/۰۱۵	ASTM D70	گرم بر سانتی متر مکعب	وزن مخصوص
۶۳	ASTM D5	دهم میلی متر	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد
۳۱۸	ASTM D92	درجه سانتی گراد	درجه اشتعال
۴۸	ASTM D36	درجه سانتی گراد	نقطه نرمی
۱۱۱	ASTM D2170	سانتی استوکس	ویسکوزیته در ۱۶۰ درجه سانتی گراد

جدول ۳. مشخصات مخلوط آسفالتی

مقدار	واحد	مشخصات
۵/۲	درصد	درصد قیر
۴/۲	درصد	فضای خالی
۱۱۱۲	کیلوگرم	مقاومت مارشال
۲/۲۵	گرم بر سانتی متر مکعب	وزن مخصوص
۶۶	درصد	VFA

جدول ۴. نتایج آزمایشها بر روی محصولات ژئوتکستایل

مقاومت کششی عریضی (Grab(N))	مقاومت کششی طولی (Grab(N))	نقطه ذوب (درجه سانتی گراد)	وزن واحد سطح (gr/Cm ^۲)	نوع ژئوتکستایل
ASTM D۴۶۳۲	ASTM D۴۶۳۲	ASTM D۲۷۶	ASTM D۵۲۶۱	
۵۳۹±۷۸	۶۵۶±۶۹	۱۶۰	۱۵۰±۷	PGM ۱۴
۸۸۳±۵۹	۹۷۲±۷۸	۱۵۱	۳۰۷±۵	PGM ۵۰-۵۰
۹۹۳±۶۵	۱۱۷±۸۱	۱۶۵	۴۲۸±۵	PGM ۱۰۰-۱۰۰

جدول ۵. مشخصات الیاف شیشه و کربن و پلی استر در ژئوتکستایلها

حد نهایی کرنش در حالت اندود با قیر (mm/mm)	مدول کششی در حالت اندود با قیر (Gpa)	مدول کششی (Gpa)	مقاومت کششی (Gpa)	نوع الیاف
٪۱۵	۲۴۰	۲۰۰-۴۰۰	۲/۵-۵	کربن
٪۳-٪۴۵	۷۳	۶۵-۹۰	۱/۵-۲/۵	شیشه
٪۱۲	۱۵	۱۰-۲۵	۱/۲-۳	پلی استر

اندود با قیر در این الیاف بسیار کم است (۱۵ درصد میلی متر در هر میلی متر)؛ بنابراین الیاف کربن در صورتی که به خوبی بین لایه آسفالتی مهار شوند، می توانند ایجاد و گسترش ترکهای

همانطور که از داده های جدول ۵ استنباط می شود، الیاف کربن دارای مدول کششی و مقاومت کششی بسیار زیادی نسبت به دیگر الیاف اند. در ضمن حد نهایی کرنش در حالت

انعکاسی و خستگی را به تأخیر بیندازند.

نمونه‌های تیرچه آسفالتی براساس رابطه‌های ۵ تا ۷ به دست می‌آید (AASHTO, 2011).

۲-۲- روش اجرای آزمایش و تئوری

در این تحقیق همه آزمایش‌ها به روش تیرخستگی انجام گرفت و ژئوتکستایل‌ها در زیر نمونه آسفالتی قرار داشتند. طول، عرض و ارتفاع نمونه‌ها مطابق روش استاندارد آزمایش خستگی تیرچه خمشی اشوتو تی- ۳۲۱ بودند (AASHTO, 2011). آزمایش خستگی تیرچه خمشی در دو حالت تنش کنترل‌شده و کرنش کنترل‌شده انجام‌پذیر است. شکل موج بارگذاری در حالت تنش کنترل‌شده، سینیوسی و در حالت کرنش کنترل‌شده سینیوسی و نیمه‌سینیوسی است. در حالت تنش کنترل‌شده میزان تنش تعیین‌شده تا مرحله شکست نمونه اعمال می‌شود، ولی در حالت کرنش کنترل‌شده سیستم بازخوردی تعبیه‌شده در دستگاه بارگذاری آزمایش خستگی تیرچه، پس از هر تکرار بارگذاری، تنش را اصلاح می‌کند تا کرنش در حد مشخص‌شده ثابت باقی بماند.

در حالت کرنش کنترل‌شده به علت کاهش تنش، نمونه می‌تواند مدت زیادی بدون کاهش چشمگیر در میزان سختی باقی بماند. به این علت معیار شکست را به صورت کاهش سختی تا درصدی از سختی اولیه (اغلب ۵۰ درصد) تعریف کرده‌اند. استاندارد اشوتو تی- ۳۲۱ این میزان را ۵۰ درصد تعیین کرده است؛ اما به علت اختلاف موجود در محاسبه سختی اولیه و گاه پراکندگی در نتایج، بهترین معیار برای تعیین مرز شکست نمونه، توجه به نمودار کاهش سختی در مقابل تکرار بار است حداکثر تنش کششی و حداکثر کرنش کششی و سختی خمشی

$$\sigma_t = (0.357P)/(bh^2) \quad (5)$$

σ_t : حداکثر تنش کششی (پاسکال)؛

P: بار واردشده توسط دستگاه (نیوتن)

b: عرض متوسط نمونه (متر)؛

h: ارتفاع متوسط نمونه (متر).

$$\varepsilon_t = (12\delta h)/(3L^2 - 4a^2) \quad (6)$$

δ : حداکثر تغییر شکل در مرکز تیر (متر)؛

a: فاصله بین تکیه‌گاه‌های داخلی، ۰/۱۱۹ متر؛

L: فاصله تیر بین تکیه‌گاه‌های خارجی، ۰/۳۵۷ متر.

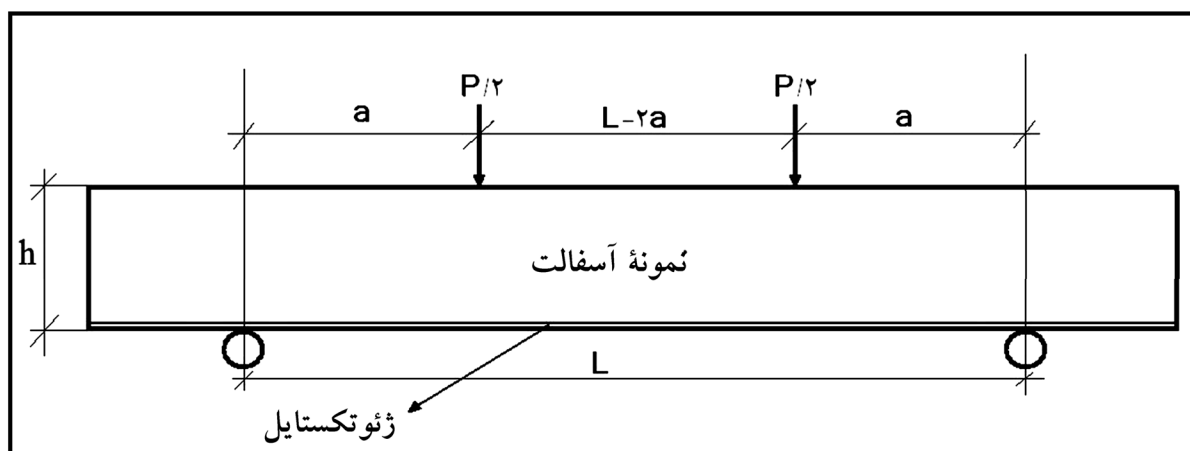
(۷)

$$S = \frac{(0.357P)/(bh)}{12\delta h} \frac{1}{(3L^2 - 4a^2)}$$

که:

S: سختی خمشی (پاسکال) است.

نمونه آسفالتی مسلح به مصالح ژئوتکستایل در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل ابعاد مورد استفاده در رابطه‌های ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۲. ابعاد نمونه آسفالتی مسلح به ژئوتکستایل

ارتفاع ۶۰ میلی‌متر برای هر نوع ژئوتکستایل ساخته شد و از هر کدام از این دال‌ها چهار تیرچه خستگی بریده شد. این دال‌ها قبل از بریده شدن در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. پنج نمونه که جنس ژئوتکستایل و آسفالت در آنها یکسان است در سطوح کرنش ۱۵۰، ۲۵۰، ۴۰۰، ۶۵۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین آزمایش شدند. بدین ترتیب برای بررسی رفتار خستگی نمونه‌های ژئوتکستایل مسلح و غیرمسلح، چهار سری پنج تایی نمونه تیرچه خستگی شامل نمونه آسفالت شاهد و سه نوع ژئوتکستایل آزمایش شدند.

۳- تحلیل نتایج

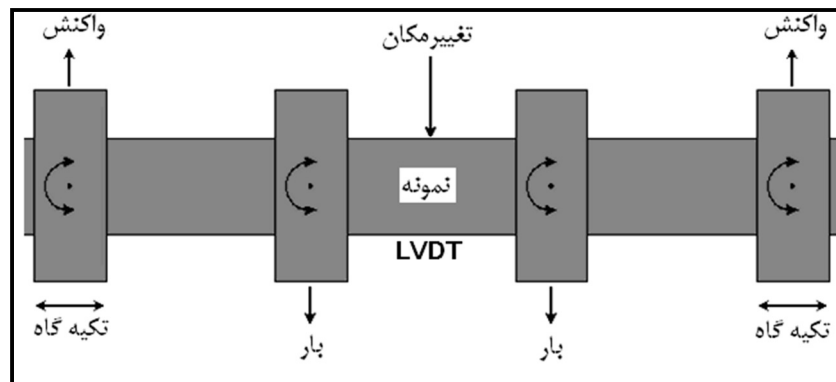
چهار سری نمونه آسفالتی در این تحقیق آزمایش شدند. نوع مخلوط آسفالتی از نظر دانه‌بندی و درصد قیر در همه نمونه‌ها یکسان بود، ولی نوع ژئوتکستایل‌ها در هر سری متفاوت بود. هر سری از نمونه‌ها در پنج سطح کرنش آزمایش شدند و عمر خستگی برای آنها تعیین شد. عمر خستگی برای چهار سری نمونه‌های آزمایش شده به شرح جدول‌های ۶ تا ۹ است.

۲-۳- دستگاه آزمایش خستگی تیرچه خمشی

دستگاه آزمایش خستگی تیرچه خمشی قادر است بارهای خمشی تکراری به نمونه‌های آسفالتی (یا دیگر مصالح) وارد کند و بار وارد شده و تغییر شکل ایجاد شده را محاسبه کند. نمونه و موقعیت گیره‌های بارگذاری و تکیه‌گاهی آن در این نوع دستگاه آزمایش خستگی در شکل ۳ نشان داده شده است. بار وارد شده ممکن است در حالت تنش کنترل شده یا کرنش کنترل شده باشد. در حالت تنش کنترل شده، تغییر شکل اندازه‌گیری شده در هر تکرار بار اصلاح می‌شود تا در تکرار بعدی کرنش تعیین شده محقق شود. در حالت تنش کنترل شده، نیروی وارد شده ثابت فرض شده و تغییر شکل ثبت می‌شود.

۲-۴- روش ساخت نمونه‌ها

در عملیات اجرایی لایه ژئوتکستایل در زیر لایه روکش قرار داده می‌شود. برای شبیه‌سازی این امر، لایه ژئوتکستایل در زیر ۶ سانتی‌متر نمونه آسفالتی ساخته شده مطابق با استاندارد آشتو قرار گرفت. این نمونه‌ها توسط دستگاه متراکم‌کننده غلتشی در آزمایشگاه ساخته شد و برای جلوگیری از چسبیدن نمونه به ته دستگاه از فویل‌های آلومینیومی استفاده شد. بدین ترتیب دو دال آسفالتی به ابعاد ۳۰۰ در ۴۰۰ میلی‌متر و به



شکل ۳. نمونه و موقعیت گیره‌های بارگذاری و تکیه‌گاهی

جدول ۶. عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی خالص

عمر خستگی	کرنش	ردیف
۹۹۰۰۹۹۱	۱۵۰	۱
۵۹۱۷۱۶۰	۲۵۰	۲
۳۹۰۶۷۰	۴۰۰	۳
۳۶۴۷۰	۶۵۰	۴
۴۹۳۰	۱۰۰۰	۵

جدول ۷. عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی مسلح به ژئوتکستایل PGM 14

ردیف	کرنش	عمر خستگی
۱	۱۵۰	۱۲۰۴۸۱۹۳
۲	۲۵۰	۶۵۳۱۶۷۹
۳	۴۰۰	۵۰۳۸۴۰
۴	۶۵۰	۴۸۸۷۶
۵	۱۰۰۰	۱۰۸۱۲

جدول ۸. عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی مسلح به ژئوتکستایل PGM 50-50

ردیف	کرنش	عمر خستگی
۱	۱۵۰	۱۲۹۸۷۰۰۱۳
۲	۲۵۰	۷۸۱۳۰۶۰
۳	۴۰۰	۶۱۲۶۰۰
۴	۶۵۰	۵۳۴۷۰
۵	۱۰۰۰	۱۲۷۱۰

جدول ۹. عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی مسلح به ژئوتکستایل PGM 100-100

ردیف	کرنش	عمر خستگی
۱	۱۵۰	۱۴۹۲۵۳۷۳
۲	۲۵۰	۸۲۱۰۰۱۹
۳	۴۰۰	۶۲۹۱۷۰
۴	۶۵۰	۵۰۲۹۲
۵	۱۰۰۰	۱۲۰۹۷

اصلی‌ترین قسمت روند شکست خستگی نمونه‌ها مرحله دوم است. در این مرحله شکست نمونه‌ها به وسیله رابطه خطی بین مدول سختی و تعداد دفعات بارگذاری تخمین زده می‌شود. این بدان مفهوم است که در مرحله دوم شکست ناشی از نرخ تجمعی خرابی را می‌توان ثابت فرض کرد. در این مرحله یک خط راست را می‌توان بر داده‌های نمونه‌های مختلف آسفالت که شامل میزان کرنش و نرخ خرابی است برازش داد. یک نقطه فرضی از تقاطع خط برازش شده با محور مدول سختی به دست می‌آید که به عنوان مدول فرضی سختی اولیه (S_0) تعریف می‌شود. شیب خط برازش شده برای محاسبه نرخ ثابت خرابی تجمعی به کار می‌رود. در اینجا شیب خط برازش شده یا نرخ ثابت خرابی تجمعی بر اساس رابطه $b = 8$ فرض می‌شود.

برای تحلیل روند رشد ترک در نمونه‌های آسفالتی از روش مکانیک خرابی استفاده شد. در روند رشد خرابی تا شکست نمونه در آزمایش تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای مراحل خرابی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد:

مرحله اول: مشخصه این مرحله، کاهش سریع سختی نمونه است. این بخش در حدود ۱۰ درصد عمر خستگی را در بر می‌گیرد؛

مرحله دوم: مشخصه این مرحله، کاهش خطی سختی نمونه است. این بخش در حدود ۹۰ درصد عمر خستگی را در بر می‌گیرد و مرحله گسترش ترک‌های ریز است؛

مرحله سوم: مشخصه این مرحله، کاهش ناگهانی سختی نمونه است. در این مرحله، نمونه در شرف شکست قرار می‌گیرد و ترک‌های بزرگ در آن گسترش پیدا می‌کند.

و ۱۰ نشان می‌دهد که خطوط برازش‌شده خستگی در برابر نرخ خرابی با کم شدن میزان مسلح‌شدگی به سمت محورهای Xها افت می‌کند.

نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوتکستایل‌ها دارای مقاومت و کیفیت بهتری نسبت به نمونه‌های غیرمسلح‌اند؛ همچنین عرض ترک در نمونه‌های مسلح کاهش می‌یابد، زیرا حتی در پایان آزمایش عمر خستگی ژئوتکستایل و الیاف شیشه پیوستگی خود را حفظ می‌کنند.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد خطوطی که از برازش خستگی در برابر نرخ گسترش خرابی به دست می‌آیند با کاهش میزان تسلیح به سمت پایین منحنی (محور Xها) افت می‌کنند. این بدین مفهوم است که نمونه‌های مسلح همیشه نرخ رشد ترک کمتری دارند.

این موضوع از روند تغییرات b (عامل رشد خرابی) نیز مشخص است این کاهش نرخ برای نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوتکستایل و در سطوح کرنش پایین بیشتر است، ولی برای نمونه‌های حاوی الیاف شیشه در سطوح کرنش زیاد نرخ رشد خرابی بیشتر است. براساس مطالب یادشده می‌توان نتیجه گرفت که ژئوتکستایل‌ها رشد و گسترش ترک‌های ریز را به تأخیر می‌اندازند.

جدول ۱۲. رابطه نرخ رشد خرابی و کرنش و ضریب همبستگی R^2 سری نمونه‌ها

ضریب همبستگی (R^2)	رابطه خستگی	نوع نمونه
۰/۹۶۴	$b = 2/63.3 X^{1.0}$ $-17 X(e)^{258}$	آسفالت خالص
۰/۹۸۰	$b = 1/0.233 X^{1.0}$ $-16 X(e)^{298}$	PGM ۱۴
۰/۹۶۴	$b = 1 X^{1.0}$ $-16 X(e)^{346}$	PGM ۵۰-۵۰
۰/۹۶۶	$b = 5/28 X^{1.0}$ $-17 X(e)^{60}$	PGM ۱۰۰



شکل ۴. چهارسری دوتایی دال از نمونه‌های مسلح به ژئوتکستایل و شاهد

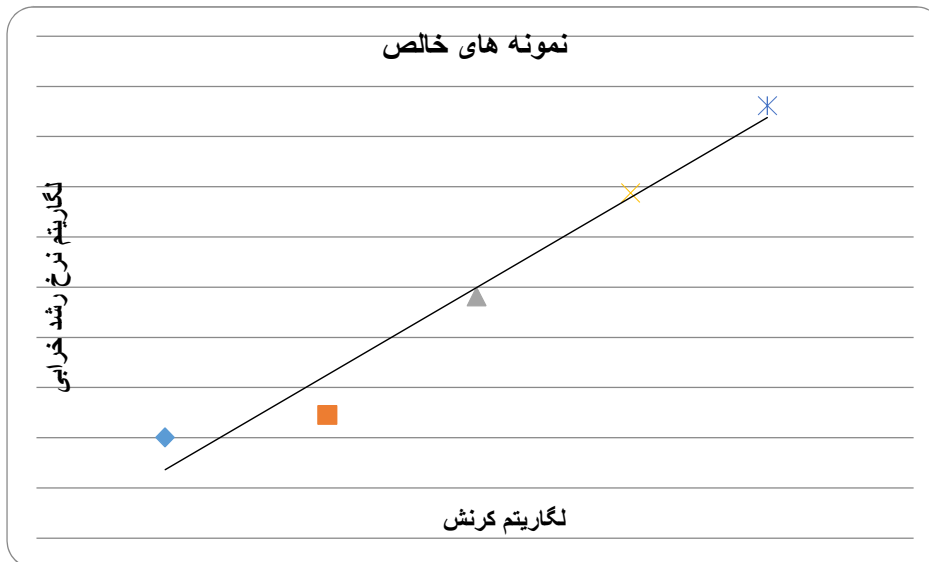
$$b = dD/dN \quad (۸)$$

ثابت‌های مربوط به نرخ رشد خرابی برای نمونه‌های مختلف در جدول ۱۱ آمده است برای انواع نمونه‌ها شرایط سطوح کرنش در برابر b رسم شد و برازش نمایی بر روی نقاط مختلف آنها انجام گرفت. این نمودارها در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. رابطه نرخ رشد خرابی و کرنش برای چهار نوع نمونه در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

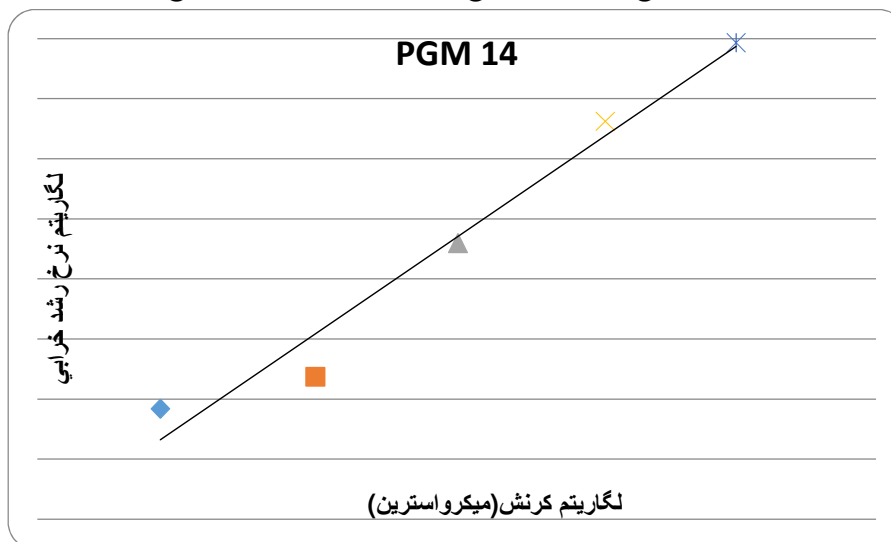
جدول ۱۱. نرخ رشد خرابی در سطوح کرنش مختلف (10^6)

سطح کرنش	غیرمسلح	PGM 14	PGM 50-50	PGM 100-100
۱۵۰	۰/۱۰۱	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	۰/۰۶۷
۲۵۰	۰/۱۶۹	۰/۱۵۳۱	۰/۱۲۸	۰/۱۲۱۸
۴۰۰	۲/۵۶۰	۱/۹۸۵	۱/۶۳۲	۱/۵۸۹
۶۵۰	۲۷/۴۲۰	۲۰/۴۶	۱۸/۷۰	۱۹/۸۸
۱۰۰۰	۲۰۲/۸	۹۲/۴۹	۷۸/۶۸	۸۲/۶۷

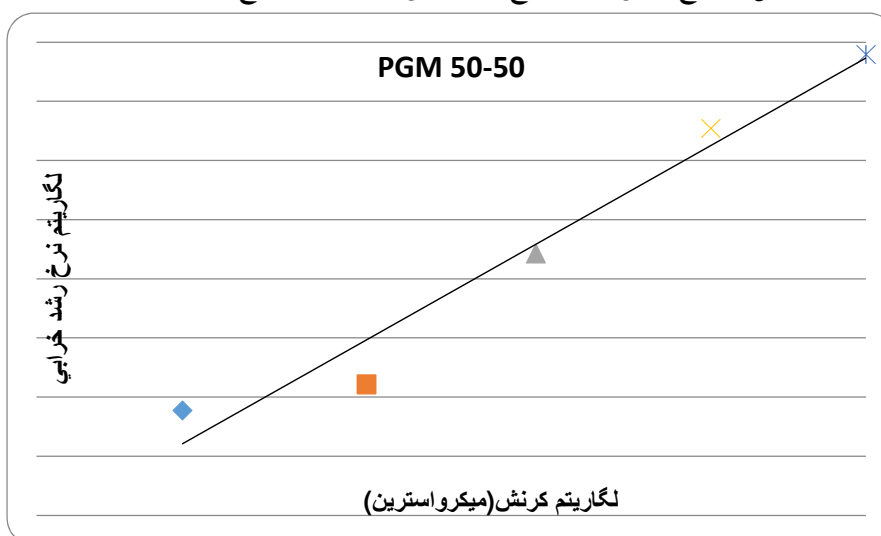
همچنان که از تغییرات سختی نمونه‌ها در برابر تعداد بارگذاری مشخص است نمونه‌های مسلح سختی بیشتری نسبت به نمونه‌های غیرمسلح دارند و این افزایش سختی برای نمونه‌های حاوی الیاف شیشه باز هم بیشتر است. شکل‌های ۹



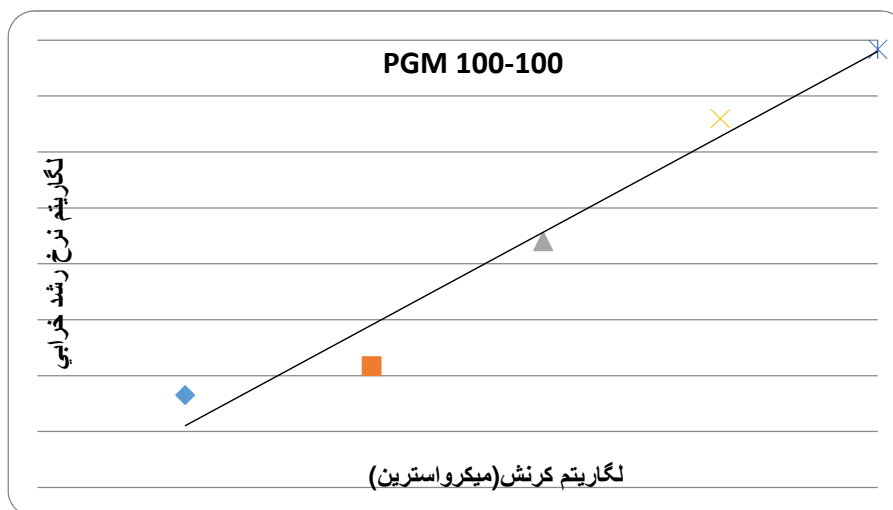
شکل 5. سطح کرنش در برابر نرخ رشد خرابی در نمونه‌های غیر مسلح



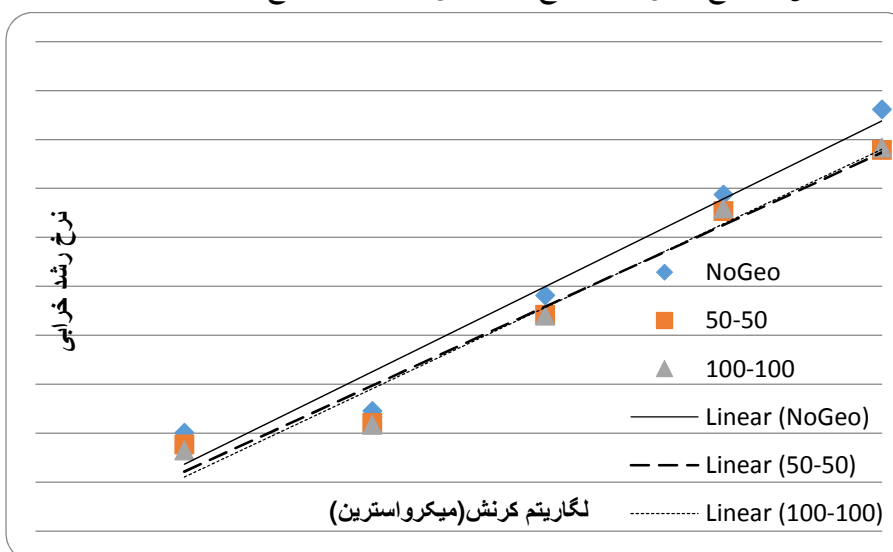
شکل 6. سطح کرنش در برابر نرخ رشد خرابی در نمونه‌های مسلح به PGM 14



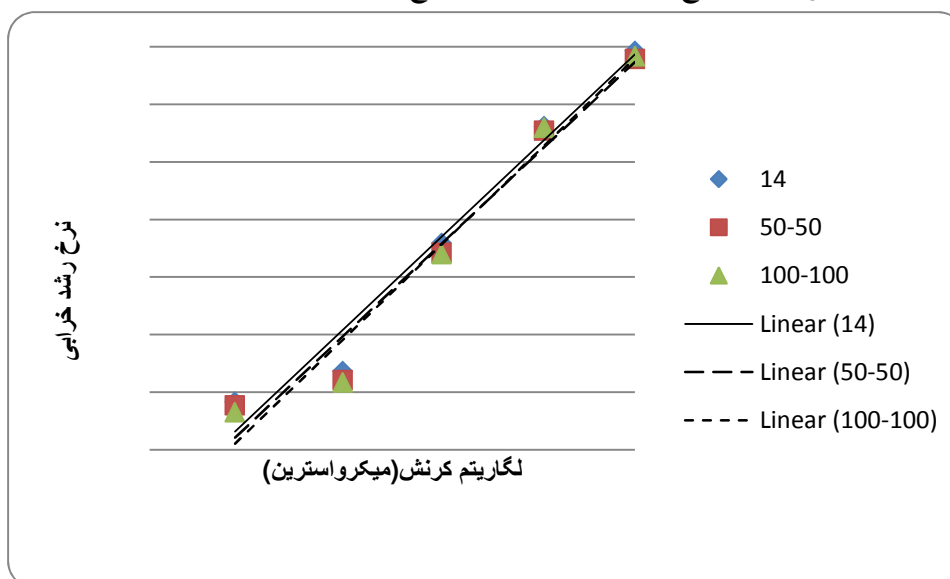
شکل 7. سطح کرنش در برابر نرخ رشد خرابی در نمونه‌های مسلح به PGM 50-50



شکل ۸. سطح کرنش در برابر نرخ رشد خرابی در نمونه‌های مسلح به PGM ۱۰۰-۱۰۰



شکل ۹. مقایسه نرخ رشد خرابی در نمونه‌های مسلح به یاف شیشه و آسفالت خالص



شکل ۱۰. مقایسه نرخ رشد خرابی در نمونه‌های مسلح و غیرمسلح به یاف شیشه

غیرمسلح دارند. همچنین عرض ترک در نمونه‌های مسلح کاهش می‌یابد؛ این بدین خاطر است که حتی در پایان عمر خستگی ژئوتکستایل پیوستگی خود را حفظ می‌کنند.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد خطوطی که از برآزش نرخ رشد خرابی در برابر کرنش به دست می‌آیند با کاهش میزان تسلیح به سمت پایین منحنی (محور X) افت می‌کنند؛ این بدین معناست که نمونه‌های مسلح همیشه نرخ رشد ترک کمتری دارند.

بر اساس مطالب یادشده می‌توان نتیجه گرفت که ژئوتکستایل‌ها رشد و گسترش ترک‌های ریز را به تأخیر می‌اندازند. بررسی تغییرات نرخ رشد خرابی بر اساس نوع ژئوتکستایل و میزان کرنش اعمال‌شده در آزمایش خستگی نشان داد که الیاف شیشه در کاهش رشد خرابی در سطوح کرنش کم کارایی دارند. بنابراین برای استفاده در مسیرهای شلوغ و پرتراфик مناسب‌اند، ولی برای استفاده در مسیرهای کم‌ترافیک بهتر است از ژئوتکستایل‌های غیرمسلح استفاده شود.

۵- منابع

— عامری، م. شاهی، ج. و خانی‌سانج، ح. ۱۳۹۰ "ارزیابی تأثیر ژئوتکستایل‌های مورد استفاده، بر عمر خستگی رویه آسفالتی در راه‌های کشور" فصلنامه علمی - پژوهشی حمل‌ونقل، سال دوم، شماره ۱، پاییز ۱۳۸۹.

— AASHTO. (2011) "Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending", AASHTO Designation T321-07.

— ASTM D7460 - 10. (2012)., "Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending", Volume 04.03.

— Button, J.W. and Lytton, R.L. (2007) "Guidelines for Using Geosynthetics with Hot Mix Asphalt Overlays to Reduce Reflective Cracking", In Transportation Research Board 2007 Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.

— Chang, T.T., Ho, N.H., Chang, H.Y and Yeh, H.S, (1999) "Laboratory and case study for

همچنان که از نمودارها در شکل‌های ۹ و ۱۰ و داده‌های مندرج در جدول ۱۱ استنباط می‌شود، در کرنش‌های شدید در حد ۱۰۰۰ میکرواسترین نرخ رشد خرابی انواع آسفالت مسلح تفاوت چندانی ندارد. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که اگر کرنش از حد خاصی فراتر رود وجود الیاف شیشه برای کنترل نرخ خرابی مؤثر نخواهد بود. این حقیقت را می‌توان ناشی از لغزش الیاف شیشه در کرنش‌های شدید و عدم مهار این الیاف توسط چسباننده قیر بین نمونه آسفالتی و ژئوتکستایل دانست. این امر بیشتر به دلیل شرایط نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه است؛ زیرا به دلیل ابعاد محدود، امکان ایجاد طول گیرایی کافی در نمونه‌های مسلح به الیاف شیشه وجود ندارد. البته تحقق این موضوع در واقعیت نیاز به مطالعات بیشتر میدانی دارد؛ زیرا در عمل به نظر می‌رسد الیاف شیشه در لایه‌های روسازی دارای طول گیرایی کافی باشند. این طول گیرایی به سبب ابعاد بزرگ‌تر لایه‌های آسفالتی در واقعیت است و لغزش ژئوتکستایل بر روی آسفالت را مهار می‌کند.

در سطوح کرنش کم با مسلح شدن نمونه آسفالتی به ژئوتکستایل و متعاقب آن به الیاف شیشه نرخ رشد خرابی کاهش می‌یابد. این موضوع تأثیر وجود الیاف شیشه در راه‌های با ترافیک زیاد را خاطر نشان می‌کند. بنابراین بهتر است در راه‌های پرتراфик از ژئوتکستایل‌های مسلح به الیاف شیشه استفاده شود و برای مهار خرابی در راه‌های کم‌ترافیک و با در نظر گرفتن منافع اقتصادی، کاربرد پارچه‌گونه‌های غیرمسلح مانند PGM-14 مناسب است. با دقت بیشتر در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است که افت نمودار نمونه‌های مسلح به الیاف شیشه به سمت محور ایکس‌ها نسبت به آسفالت خالص خیلی بیشتر از ژئوتکستایل غیرمسلح است؛ بنابراین اثر وجود یک میان‌لایه بسیار بیشتر از مسلح بودن آن است و کاربرد یک ژئوتکستایل استاندارد غیرمسلح اثر زیادی در انتشار خرابی‌ها در لایه آسفالتی دارد؛ زیرا در بسیاری از موارد تفاوت قیمت یک ژئوتکستایل مسلح به الیاف شیشه چندبرابر نمونه غیرمسلح آن است؛ این موضوع در ارزیابی‌های اقتصادی شایان توجه است.

۴- نتیجه گیری

این تحقیق نشان داد که نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوتکستایل‌ها، مقاومت و کیفیت بهتری نسبت به نمونه‌های

- Mahrez, A. and Karim, M. R. (2010) "Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass", International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(12), pp. 1840–1847.
- Rongzong, W. and Harvey, T.J. (2003) "Modeling of cracking in asphalt concrete with continuum damage mechanics", 16th ASCE Engineering Mechanics Conference July 16-18, University of Washington, Seattle.
- Saraf, C.L., Majidzadeh, K and. William, T. (2001) "Effect of reinforcement on fatigue life of asphalt beams", Transportation Research Record, N. 1534, pp. 66-71.
- Geogrid reinforced flexible pavement overlay", TRB A2K07 Committee78" Annual Meeting.
- Hosseini, H. R. A., Darban, A. K. and Fakhri, M. (2009) "The effect of geosynthetic reinforcement on the damage propagation rate of asphalt pavements", Scientia Iranica, Vol. 16, No.1, PP. 26-32.
- Jaecklin, F.P. And Seherer, J. (1996) "Asphalt Reinforcing Using Glass Fiber Grid "Glasphalt"", Reflective Cracking In Pavement, RILEM, London.
- Lee, S. Mun, S. and Kim, R. (2011) 'Fatigue and rutting performance of lime-modified hot-mix asphalt mixtures', Construction and Building Materials, 25, 4202–4209.