

عملکرد ژئوگریدهای کربنی در بهبود خستگی و کاهش کرنش‌های کششی روسازی‌های انعطاف پذیر براساس مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

حسن زیاری^{۱*}، شمس نوبخت^۲ و امیر بری دیزج^۳

^۱دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

H.ziari@iust.ac.ir

چکیده: بیشتر خرابی‌ها در روسازی‌های انعطاف پذیر، در اثر دو عامل ترک خوردگی یا شیارشدگی رخ می‌دهد. توسعه ترک‌ها را می‌توان در سه بخش تقسیم بندی کرد. در مرحله اول، ترک آغاز می‌شود. در مرحله دوم ترک‌های ریز ایجاد شده شروع به گسترش می‌کنند و ترک‌های بزرگ تر تشکیل می‌شوند. مرحله سوم مرحله شکست است. ژئوگریدها تنش‌ها و بارهای وارده به روسازی را در یک سطح مناسب پخش کرده و باعث افزایش مقاومت باربری می‌شوند. این پروژه به بررسی میزان عملکرد ژئوگریدهای دارای الیاف کربن و شیشه و میزان تأثیر در تأخیر رشد ترک‌ها در روسازی‌های انعطاف پذیر و مقایسه با خروجی برنامه‌های کامپیوتری BISAR3.0 و CIRCLY5.0 می‌پردازد. در این پروژه از دستگاه‌های خستگی تیر، ژیراتوری و ITS استفاده شده است. از بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و بدون استراحت، در حالت کرنش کنترل شده، جهت آزمایش خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای استفاده شد. در خاتمه با هماهنگی مناسب بین نتایج آزمایشات با روش‌های عددی و برنامه‌های کامپیوتری مشاهده شد که ژئوگرید و الیاف کربن، قابلیت جذب ۲۵ تا ۴۰ درصد از تنش‌ها و کرنش‌های کششی را دارند.

کلمات کلیدی: ژئوگرید، آزمایش تیرچه خمشی، اختلاف زاویه فاز.

The Function of Carbon Fiber Geogrids in Improvement of Fatigue and Lowering the Tensile Strains of Flexible Pavements. A Comparison Between Experimental and Numerical Results

H. Ziari, Sh. Nobakht and A. B. Dizaj

Abstract: Most of the distress in flexible pavements is due to cracking and rutting. Propagation of cracks is divided into three modes. Mode I is opening the cracks, mode II is propagation of cracks through the overlay and mode III is breakage. Geogrids distribute the street and loads to adequate area and cause augmentation bearing capacity. This work surveys the function of carbon and glass fiber geogrids on delay of crack propagation in flexible pavements; by comparing laboratory and computer software (BISAR3.0 and CIRCLY5.0) results. The research utilizes the beam fatigue test, gyratory compactor and indirect tensile test. Simulated–repeated loading with a frequency of 10 Hz simulate high speed traffic was applied to beam fatigue specimen. Evaluation of the results is work test as well as numerical calculation using the software yield comparable results and 25-40% tensile stresses can be absorbed as a result of carbon fiber Geogrids.

Keywords: Geogrid, Beam Fatigue Test, Degree of Phase Angel, Gyratory Compactor.

۱- مقدمه

ژئوسنتتیک‌ها محصولات مسطحی هستند که از مواد پلیمری ساخته شده و به عنوان یک بخش جدایی ناپذیر در پروژه‌های مهندسی عمران به همراه خاک، سنگ، یا سایر مصالح مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک به کار برده می‌شوند [۱].

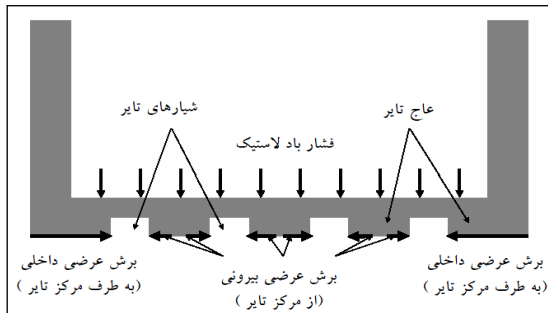
ژئوسنتتیک‌ها را می‌توان در قسمت‌های مختلف روسازی برای پوشش ضعف‌های آن به کار برد. دو نقش اساسی آنها جداکننده و فیلتر برای جلوگیری از مخلوط شدن لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه و همچنین مسلح کننده برای کنترل کرنش‌هایی است که باعث خرابی می‌شوند. از این مواد می‌توان در روسازی‌های جدید و یا در روکش‌ها استفاده کرد [۲]. همچنین مشاهدات میدانی در روسازی‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها نشان می‌دهند که لایه‌های مسلح کننده باعث بهبود زهکشی، افزایش عمر روسازی، جلوگیری از نشست‌های موضعی و کاهش شیارشدگی می‌شوند [۳-۶].

۲- روش‌های جلوگیری از رشد ترک‌های انعکاسی

تحقیقات زیادی در زمینه تأخیر انداختن رشد ترک‌های انعکاسی در رویه‌های HMA انجام شده است. طبق بررسی‌های انجام شده توسط Roberts و همکارانش در سال ۱۹۹۶ چهار روش اصلی جهت به تأخیر انداختن ترک‌های انعکاسی ارائه شد که در زیر آورده شده است:

- افزایش ضخامت رویه آسفالت گرم
 - ملاحظات ویژه در طراحی روسازی و آسفالت
 - اجرای ژئوسنتتیک‌ها (ژئوگریدها و ژئوکامپوزیت‌ها)
 - انجام عملیاتی بر روی ترک‌های به وجود آمده [۷].
- ترک‌های انعکاسی تحت تأثیر دو عامل اصلی به وجود می‌آیند که در ذیل به آنها اشاره می‌شود:
- الف) نیروی خارجی بار چرخ: توزیع تنش و سطح کرنش بالا در بالای خرابی موجب رشد ترک می‌گردد. یکپارچه نبودن و عدم پیوستگی کامل بین روسازی قدیم و جدید هم باعث کاهش سختی خمشی می‌شود. هنگامی که تنش‌های وارده به جسم روسازی از حد مقاومت نهایی فراتر می‌رود، تنش‌ها متمرکز شده و باعث ایجاد خرابی و شروع فاز یک می‌گردد. فاز اول بیشتر مربوط به ایجاد و باز شدن ترک است. با شروع فاز دوم تنش‌های برشی به رشد ترک به سطح رویه جدید کمک می‌کنند. توزیع بار چرخ بر

روسازی در شکل ۱ قابل مشاهده است [۸].



شکل ۱: جزئیات تنش‌های تماسی تایر با سطح روسازی [۹]

ب) تغییرات روزانه دما: به علت عدم پیوستگی دو سطح در روسازی و تغییرات دمایی، تنش‌های کششی در مکان‌هایی متمرکز می‌گردند و باعث شروع فاز اول می‌شود [۱۰]. ژئوسنتتیک‌ها با کاربردهایی نظیر زهکش، ضد آب و مقاوم‌سازی روکش‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ژئوگریدها با توزیع بارهای وارده بر سطح مناسب‌تری باعث به تأخیر انداختن رشد ترک‌های انعکاسی و کاهش شیار شدگی سطح آسفالت می‌گردند [۱۱].

۳- عمر خستگی

برای آزمایش خستگی آسفالت بتنی رابطه کرنش کشش اولیه و عمر خستگی به صورت یک خط در مقیاس لگاریتمی نشان داده می‌شود که رابطه مشابه بین لگاریتم کششی وارده و لگاریتم عمر خستگی وجود دارد و به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

$$N_f = k \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^n \quad (1)$$

N_f = تعداد تکرار بار تا لحظه شروع ترک

ϵ = کرنش کشش اولیه

k, n = ضرایب ثابت وابسته به خصوصیات فنی آسفالت در آزمایش خمشی.

Van Dijk در سال ۱۹۷۵ از مقایسه آزمایش چرخ و آزمایشات بارگذاری تکراری دریافت که آزمایشات کنترل کرنش مشخصات بهتری را که مربوط به شروع و پخش ترک‌ها باشد، می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌کند این نوع آزمایشات اساسی برای تعیین معیارهای خستگی برای روسازی آسفالتی مد نظر قرار گیرد [۱۳]. همچنین رابطه مشابهی بین مجموع انرژی تلف شده و عمر خستگی گزارش نمود. کارهای بعدی وی نشان داد که رابطه بین

۵- روش تهیه نمونه‌های آزمایش خستگی

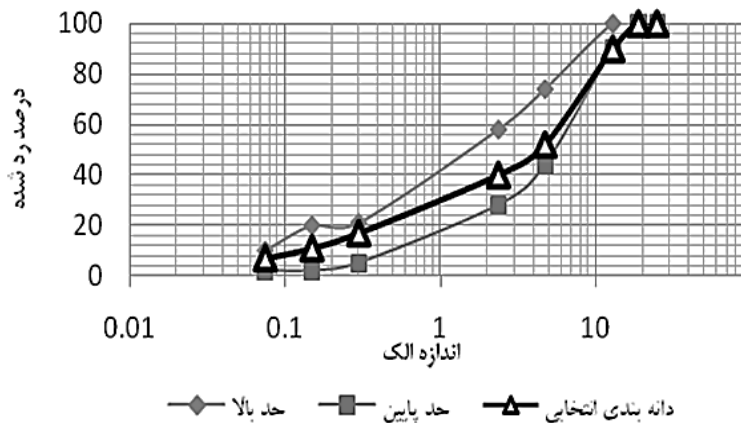
پس از اجرای مقطع مورد نظر برای تهیه نمونه‌های آزمایش خستگی تیر از آسفالت مورد استفاده، نمونه‌برداری شد که این نمونه‌برداری توسط ۸ صفحه فلزی 50×50 سانتی متر انجام گرفت [۱۶]. پس از چند روز با استفاده از کارت‌های اطراف صفحات خالی شده و این صفحات با آسفالت اجرا شده روی آن خارج و به جهت برش نمونه‌ها منتقل شد. بر اساس استاندارد AASHTO-TP321-07 [۱۲] و استاندارد SHRP-M009 ابعاد نمونه‌ها $381 \times 63 \times 50$ میلیمتر با تیرانس ۵ میلیمتر است. با توجه به دقت مورد نیاز در برش نمونه‌ها، تلاش شد که اره و تیغه مناسب برای این کار انتخاب شود. نمونه‌های آزمایش Beam Fatigue از قطعات بزرگ برداشت شده از محل تهیه شد؛ به گونه‌ای که در ۶ جهت برش خورده در ۲۴ نمونه با لایه مسلح کننده در ارتفاع $1/3$ از زیر نمونه و در ۱۲ نمونه لایه مسلح کننده در ارتفاع $1/2$ قرار گیرد.

مجموع انرژی تلف شده در مقابل تعداد تکرار بار مستقل از فرمول اختلاط نیست؛ ولی مستقل از روش آزمایش است [۱۴].

ژئوگریدهای استفاده شده در این تحقیق از نوع شبکه‌های دوجوری می‌باشد که از محصولات شرکت S&P سوئیس بوده و از طریق شرکت آگرین پارت کهن تهیه شد.

۴- مواد به کار رفته در نمونه‌های آزمایشگاهی

سنگ دانه‌های مورد استفاده در شرکت پیمانکار آسفالت، نمونه‌برداری شد و برای تست‌های مورد نیاز و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی به آزمایشگاه مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح و مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت منتقل گردید. آزمایش دانه‌بندی آسفالت اجرا شده در محل انجام شد که نتایج در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی انتخابی

جدول ۱: مشخصات ژئوگرید Carbophalt G و Glasphalt G

ویژگی	استاندارد	واحد	مقدار	استاندارد	واحد	مقدار
مواد خام			الیاف کربن و شیشه			
اندازه منافذ		mm	۲۰×۲۰		mm	۲۰×۲۰
مقاومت کششی طولی - عرضی	EN-ISO 10319	kN/m	۱۲۰-۲۰۰	EN-ISO 10319	kN/m	۱۲۰-۲۰۰
کشیدگی در حداکثر نیرو طولی - عرضی	EN-ISO 10319	%	۳/۵-۱/۵	EN-ISO 10319	%	۳/۵-۱/۵
وزن در واحد سطح	EN965	g/m ²	۲۰۰	EN965	g/m ²	۲۰۰
ضریب تغییرات		%	<۱۰		%	<۱۰
مدول کشش		kN/mm ²	۷۳۰۰۰×۷۳۰۰۰		kN/mm ²	۷۳۰۰۰×۲۴۰۰۰

آزمایش خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای بر روی تیری به ابعاد ۵۰/۸ ارتفاع و ۶۳/۵ عرض و ۳۸۱ طول (میلیمتر) با رواداری ۶/۵ (ASHTO Tp8-96) اعمال می‌شود. با توجه به تعداد نمونه‌های به دست آمده در عملیات برش دال‌های برداشت شده از اجرای میدانی و توجه به حداقل نمونه‌های مورد نیاز برای رسم منحنی‌های خستگی، برای هر حالت مسلح شده و مسلح نشده ۳ نمونه در ۴ سطح کرنش مورد آزمایش قرار گرفت.

از بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس 10Hz و بدون استراحت در حالت کرنش کنترل شده استفاده شد. نمونه‌ها در ۴ سطح تنش ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ میکرون و در دمای ۲۰ ± ۰/۸ درجه سانتیگراد تست شد. نمونه‌ها ۲۴ ساعت در دمای محیط و ۲ ساعت در محفظه برای رسیدن به دمای مورد نظر نگهداری شده، سپس تحت آزمایش قرار گرفت. آزمایشات تا رسیدن به ۵۰ درصد سختی اولیه ادامه پیدا کرد.

نمودارهای سطوح کرنش و انرژی تجمعی تلف شده در مقابل عمر خستگی برای تمام حالت‌ها ترسیم گردیده و با استفاده از نرم‌افزار بر روی این نقاط رگرسیون نمایی انجام گردید که نمودارهای حاصل، معادلات به دست آمده و ضریب همبستگی (R^2) مطابق شکل‌های ۴ تا ۷ و جداول ۳ و ۴ ارائه می‌گردد.

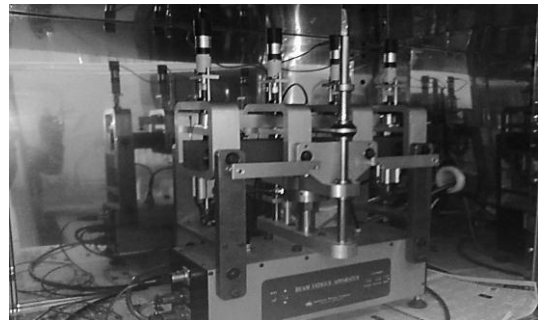
در پایان ۱۲ نمونه مسلح نشده، ۱۲ نمونه مسلح با ژئوگرید شیشه‌ای و ۲۴ نمونه مسلح شده با ژئوگرید کربنی به دست آمد. با توجه به اصول مندرج در نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی مقدار قیر بهینه نسبت به کل مخلوط با دانه بندی و نسبت‌های ذکر شده برای قشر بیندر ۵/۳ درصد به دست آمده است.

جدول ۲: نتایج آزمایشگاهی تعیین قیر بهینه

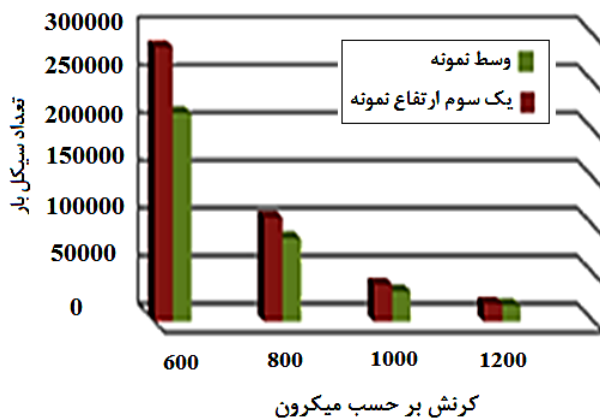
ویژگی	استاندارد مورد استناد	واحد	مقدار
درصد قیر	AASHTO	%	۵/۳
استحکام مارشال	-	kg	۸۸۷

۶- آزمایش خستگی تیر (Beam Fatigue)

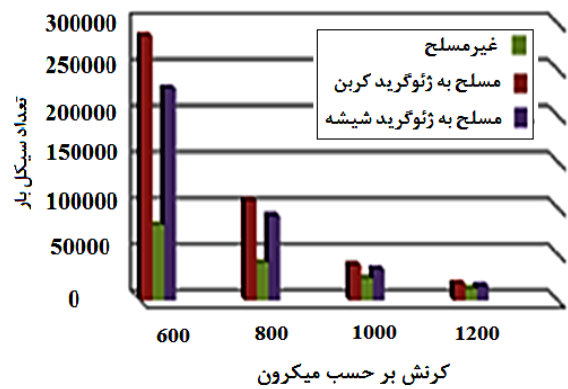
دستگاه مورد استفاده fatigue ساخت شرکت ELE با طراحی شرکت استرالیایی IPC Global که توسط آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت خریداری شده بود (شکل ۳).



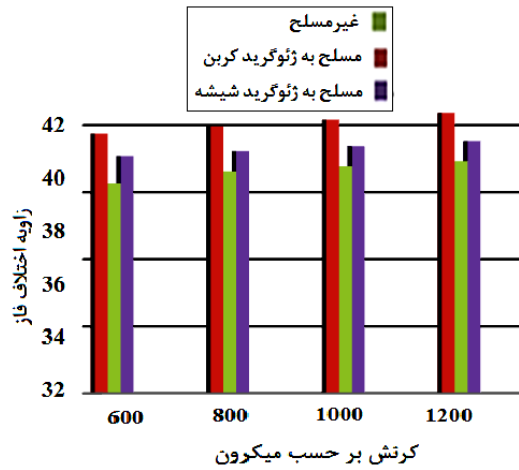
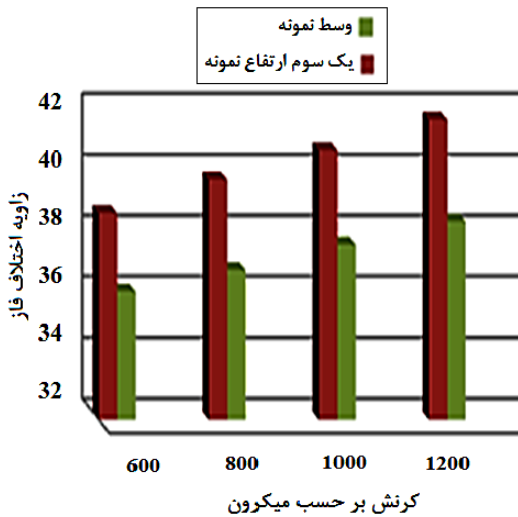
شکل ۳: دستگاه مورد استفاده خستگی ساخت شرکت ELE



شکل ۵: نمودار میله‌ای (عمر نمونه‌ها - کرنش)



شکل ۴: نمودار میله‌ای (عمر نمونه‌ها - کرنش)



شکل ۷: نمودار میله‌ای (اختلاف زاویه فاز - کرنش) نمونه‌های کربنی

شکل ۶: نمودار میله‌ای (اختلاف زاویه فاز - کرنش)

جدول ۳: معادلات خستگی به دست آمده (انرژی تلف شده)

ضریب همبستگی (R^2)	معادله خستگی	نمونه آسفالتی
0.9885	$W_N = 0.0299(N_f^{0.5867})$	مسلح به ژئوگرید کربن و محل یک سوم ارتفاع نمونه
0.9888	$W_N = 0.0194(N_f^{0.6218})$	مسلح به ژئوگرید کربن و محل وسط نمونه
0.9923	$W_N = 0.0316(N_f^{0.5818})$	مسلح به ژئوگرید شیشه
0.9463	$W_N = 7 \times 10^{-5}(N_f^{1.1361})$	غیر مسلح

جدول ۴: معادلات خستگی بدست آمده برای نمونه‌های مختلف

ضریب همبستگی (R^2)	معادله خستگی	نمونه آسفالتی
0.9956	$N_f = 4.329 \times 10^{16} \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{4.016}$	مسلح به ژئوگرید کربن و محل یک سوم ارتفاع نمونه
0.9950	$N_f = 1.037 \times 10^{16} \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3.831}$	مسلح به ژئوگرید کربن و محل وسط نمونه
0.9941	$N_f = 1.576 \times 10^{16} \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3.891}$	مسلح به ژئوگرید شیشه
0.9921	$N_f = 2.328 \times 10^{12} \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{2.673}$	غیر مسلح

می‌شود، کرنش کششی در سطح زیرین رویه آسفالتی غیر مسلح پس از عبور ۲۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری چهارنقطه‌ای، $600 \mu\text{strain}$ و در سطح زیرین رویه آسفالتی مسلح به ژئوگرید کربن $400 \mu\text{strain}$ است. کرنش‌های کششی در سطح زیرین لایه آسفالت مسلح به ژئوگرید کربن نسبت به رویه غیر مسلح به مقدار $33/3$ درصد کاهش یافته است.

با استفاده از نرم‌افزار BISAR3.0 تغییرشکل زیر لایه آسفالت در دو مورد غیرمسلح و مسلح به وسیله ژئوگرید کربن مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۸

۷- مدل کردن نمونه‌ها در محیط برنامه‌های

BISAR3.0 و CIRCLY5.0

به وسیله مدل کردن نمونه‌های مسلح به ژئوگرید کربن و غیر مسلح در محیط برنامه CIRCLY5.0 مشاهده شد که در حالت غیر مسلح، تنش‌ها و کرنش‌های کششی در بخش زیرین لایه آسفالت بیشتر است از حالتی که از ژئوگرید کربن استفاده می‌شود. همچنین در حالت مسلح میزان تنش‌های کششی کاسته می‌شود و تنش‌ها و ترک‌ها به خوبی پخش می‌شوند. همان‌گونه که در شکل‌های و مشاهده

اصلاح قرار گیرند. با بررسی و مقایسه مدول الاستیسیته دو حالت مسلح و غیرمسلح، نتایج آزمایش خستگی تیر میزان سه دهم برای ضریب به دست آمد. پس از تحلیل این برنامه مشخص شد که میزان تغییر شکل قائم روی خاک بستر در حالت مسلح به میزان ۳۴٪ از حالت غیرمسلح کمتر است.

و ۹ قابل مشاهده است. مدل مورد استفاده در حالت غیرمسلح شامل ۱۲ cm لایه آستر و ۸ cm لایه رویه می باشد. در حالت مسلح، مکان قرارگیری ژئوگرید در وسط ضخامت مجموع آستر و رویه انتخاب شده است. به منظور مدل کردن تأثیر ژئوگرید در نرم افزار مذکور، مدول الاستیک لایه های بالای ژئوگرید باید توسط ضریبی مورد

جدول ۵: شرایط و مقادیر مدل کردن در برنامه CIRCLY5.0

مدول الاستیسیته (MPa)	تنش عمودی (MPa)	نیروی قائم (kN)	ضریب پواسون	ضخامت لایه (mm)	مشخصات لایه آسفالت گرم
2000	0.577	20	0.45	50.8	غیر مسلح
2600	0.577	20	0.45	50.8	ژئوگرید کربن در یک سوم لایه

Deformation under wearing course (μ):
 XX = 58,3
 YY = 33,9
 ZZ = 59,3

Pavement layer	Thickness (cm)	Elastic Modulus (MPa)	Name of layer	loading number	load vertical (kN)	stress vertical (MPa)
1	4 cm	3000	Wearing course new	1	20	0.577
2	12 cm	4000	Binder new	2	20	0.577
3	old, existing Binder	1500	Binder existing			

شکل ۸: طراحی لایه های روسازی آسفالت غیر مسلح (نرم افزار BISAR3.0)

Deformation under wearing course (μ):
 XX = 47,4 (- 19 %)
 YY = 28,1 (- 17 %)
 ZZ = 39,5 (- 34%)

Pave-ment layer	Thickness (cm)	Elastic Modulus (MPa)	Name of layer	loading number	load vertical (kN)	stress vertical (MPa)
1	4 cm	4000 (+ 30 %)	Wearing course new Influence of S&P Carbophalt	1	20	0.577
2	4 cm	5000 (+ 30 %)	Binder new Influence of S&P Carbophalt	2	20	0.577
2 a	8 cm	4000 (no influence)	Binder new (no influence of grid)	2	20	0.577
3	old, existing Binder	1500	Binder existing			

شکل ۹: اثرات استفاده از الیاف کربن بر طراحی لایه های روسازی آسفالت (نرم افزار BISAR3.0)

بارگذاری برای هر نمونه نشان می دهد که نمونه های مسلح شده به ژئوگرید کربن و مکان قرارگیری یک سوم ارتفاع

۸- نتیجه گیری

- بررسی نمودارهای مدول سختی خمشی در مقابل کرنش

- [2] Gerard, P.T.M., *Geotextile and Geomembrance In Civil Engineering* A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, **1994**.
- [3] Ahmad, S. *Mechanistic – empirical pavement design procedure for Geosynthetically stabilized flexible pavement*, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute, **1998**.
- [4] Kwasi, A. *In-situ behavior of Geosynthetically stabilized flexible pavement*, Thesis submitted to The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute, **1997**.
- [5] Hass, R., Wall, J., and Carroll, R.G. *Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements*, In Transportation Research Record 1188, TRB, National Research Council, Washington, DC, USA, pp. 19-27, **1988**.
- [6] Tensar Earth Technologies INC. *A review of Geosynthetic function and application in pave and unpaved roads*, Technical Note, **1998**.
- [7] Roberts, F.L., P.S. Kandhal, E.R. Brown, D.Y. Lee, and T.W. Kennedy. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, **1996**.
- [8] De Bondt, A.H., *Anti-Reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphalt Overlays*. Ph.D. Thesis Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, **1998**.
- [9] فخری، منصور، بررسی روش‌های آزمایشگاهی برای کنترل ترک‌های ناشی از بارگذاری و ارائه مدل پیش بینی ترک‌های خستگی آسفالت روسازی راه‌های کشور، معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، **۱۳۸۹**.
- [10] Kim, J., Buttlar, W.G., *Analysis of reflective crack control system involving reinforcing grid over based-isolating interlayer mixture*. Journal of Transportation Engineering (ASCE) 128 (4), 375–384, **2002**.
- [11] Wasage, T.L.J., Ong, G.P., Fwa, T.F., Tan, S.A., *Laboratory evaluation of rutting resistance of geosynthetics reinforced asphalt pavement*. Journal of the Institution of Engineers Vol. 44 (2), 29–44, **2004**.
- [12] Standard Test AASHTO Provisional Standards و *Standard Test Method For Determination The Fatigue Life Of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected To Repeated Flexural Bending*. TP321-2007.
- [13] Van Dijk, W., *Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes*, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 38, **1975**.

دارای مدول سختی خمشی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. نتایج کارهای Kim et al و Brown, saraf نیز بیانگر این موضوع می‌باشد [۱۷ و ۱۸].

- نتایج حاصل از تحلیل برنامه‌های BISAR3.0 و CIRCLY5.0 نشان می‌دهد که ژئوگریدها به علت افزایش مقاومت کششی رویه‌های آسفالتی در کاهش میزان شیار شدگی موثر هستند [۱۹-۲۱].

- اختلاف زاویه فاز رابطه مسقیم با میزان فرکانس بارگذاری و فاصله زمانی تاخیر بین p متوسط و δ متوسط دارد. هرچه میزان اختلاف زاویه فاز بیشتر باشد، بار وارده به نمونه با تاخیر بیشتری باعث به‌وجود آمدن تغییر مکان و افزایش انعطاف‌پذیری می‌گردد و همچنین از شکست‌های ترد جلوگیری می‌کند. در نمونه‌ای که از ژئوگرید کربن استفاده شده بود، میزان اختلاف زاویه فاز بیشترین مقدار را در مقابل دیگر نمونه‌ها داشت که باعث کاهش رشد ترک‌ها می‌گردد که از خواص ژئوگریدها می‌باشد.

- انرژی تلف شده جمععی در حالت استفاده از ژئوگرید افزایش می‌یابد که در این زمان کربن در یک سوم ارتفاع زیرین نمونه تیرچه خمشی دارای بیشترین مقدار است، که این امر نشان می‌دهد که در این حالت انرژی بیشتری مستهلک شده است.

- بین نتایج آزمایشات با روش‌های عددی و برنامه BISAR3.0 و CIRCLY5.0 قابلیت جذب ۲۵ تا ۴۰ درصد از تنش‌ها و کرنش‌های کششی با ژئوگرید الیاف کربن هماهنگی مناسب است.

- مقاومت سازه‌ای روسازی آسفالت با استفاده از ژئوگرید الیاف کربن افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

در این قسمت بر خود لازم می‌دانیم از همکاری مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران جهت استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها و شرکت آگرین پارت کهن به جهت تامین ژئوگریدها قدردانی کنیم.

مراجع

- [1] Proc Intl. Conf. Use of fabrics in Geotechnics, Paris. Assoc. Amicale des Ingenious, **1977**.

- [18] Kim, K.W., Churl, Y.P., Seok, Y.K., *Tensile Reinforcement Of Asphalt Concrete Using Polymer Coating*, Construction And Building Materials, Vol. 10, pp 141-149, **1996**.
- [19] Al-Qadi, I.L., Brandon, T.L., Valentine, R.J., Lacina, B.A., Smith, T.E., *Laboratory Evaluation Of Geosynthetic Reinforced Pavement Sections*, In Transportation Research Record 1439, TRB, National Research Council, and Washington DC. pp. 25-31, **1994**.
- [20] Tensar, *Tensar Technical Note, BR96, Design Guideline For Flexible Pavements With Tensar Geogrid Reinforced Base Layers*, The Tensar Corporation, Atlanta, **2009**.
- [21] Perkins, S.W., *Geosynthetic Reinforcement Of Flexible Pavements: Laboratory Based Pavement Test Sections*, Federal Highway Administration Report FHWA/MT99-001/8138, Montana Department Of Transportation, **1999**.
- [14] Svasdisant T., *Analysis of Top-Down Cracking in Rubbished and Flexible Pavements*, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, **2003**.
- [15] Al-Qadi, Scarpas & Loizos, J. Penman *The use of geogrids to retard reflective cracking on airport runways, taxiways and aprons*, Pavement Cracking, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47575-4, **2008**.
- [16] Chang, T.T., Ho, N.H., Chang, H, Y., and Yeh, H, S., *Laboratory and Case Study for Geogrid Reinforced Flexible Pavement Overlay*, TRBA2K07Committee78, Annual Meeting, **1999**.
- [17] Saraf, C.L., Majidzadeh, K., William, T., *Effect Of Reinforcement On Fatigue Life Of Asphalt Beams*, Transportation Research Record, N 1534, pp 66-75, **1996**.