

ارزیابی مشخصات برشی نوسانی بین روکش و روسازی قدیمی

علیرضا نوری*، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

فریدون مقدس نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

علی خدایی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: alireza.noory@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۹ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

صفحه ۱۹-۲۷

چکیده

یکی از مهمترین خواص بین لایه های روکش و روسازی قدیمی که می تواند عملکرد روکش را به طور کامل تحت الشعاع قرار دهد مقاومت برشی بین لایه ها است. آزمایشهای زیادی برای اندازه گیری این مقاومت ابداع شده اند اما آزمایش استاندارد برای اندازه گیری این مقاومت برشی وجود ندارد. یکی از واقع بینانه ترین روشها برای ارزیابی خواص برشی بین لایه های روسازی ارزیابی مقدار سختی برشی و همچنین افت مقدار سختی برشی بین لایه های روسازی تحت بارگذاری نوسانی است. در این پژوهش آزمایش ابداعی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر که توسط دستگاهی موسوم به AUT-SLT انجام می گیرد مورد ارزیابی آماری جهت سنجش تکرار پذیری نتایج و همچنین مورد مقایسه با نتایج ارائه شده با تحقیقات پیشین قرار گرفت. نتایج آزمونهای آماری بیانگر تکرار پذیری و همچنین مشابهت فرم نمودار حاصل با نمودارهای حاصل از تحقیقات پیشین می باشد.

واژه های کلیدی: مقاومت برشی، سختی برشی، نوسانی، روکش آسفالتی

۱- مقدمه

(West, 2004) (Tscheegg, 1995) A.C., 2009)
(Wheat, (Tashman L., 2006) (Miró R., 2006)
(Chen, (Bae A., 2010) (Leng Z., 2008) 2007)
(Ferrotti G. C., 2011) 2010)

در این تحقیق ابتدا به بررسی آزمایشها به کار رفته برای ارزیابی مقاومت برشی بین لایه ها پرداخته شده و سپس شیوه های مختلف انجام آزمایش مقاومت برشی بین لایه ها تحت بارگذاری نوسانی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بارگذاری نوسانی به این دلیل اهمیت دارد که اعمال بار برشی بر روی روسازی چه به دلیل شتاب گیری یا کاهش سرعت خودرو باشد و چه باربرشی به علت عبور بار قائم از روی روسازی به وجود آمده باشد، ماهیتی نوسانی خواهد داشت.

با این وجود شمار معدودی از تحقیقات پیشین امکان اعمال بار گذاری نوسانی را فراهم نموده اند. همچنین در تعداد بسیار معدودی از دستگاههای پیشین امکان اعمال سختی ثابت بر

خواص لایه حدفصل دو لایه روکش و روسازی آسفالتی از اهمیت شایان توجهی در عملکرد روسازی برخوردار است. تعداد آزمایشهای زیادی تا کنون به منظور ارزیابی خواص بین لایه های روسازی طرح گردیده است که به صورت آزمایشگاهی یا میدانی انجام می پذیرند (Ahn, 2012).

این آزمایشها به سه دسته عمده تقسیم می شوند که شامل آزمایشهای برش، پیچش و همچنین کشش است. از میان سه دسته آزمایش مطرح شده، برش بیشترین کاربرد را در ارزیابی وضعیت بین لایه های روسازی دارد. این آزمایش به روش آزمایشگاهی معمولاً به دو صورت انجام می پذیرد که شامل برش به همراه بارگذاری قائم و برش بدون بارگذاری قائم است. بیشتر آزمایشهای میدانی اندازه گیری مقاومت برشی بین لایه ها از آزمایش برش غیر مستقیم خاک الهام گرفته شده اند که در نوع خود آزمایش رایجی به شمار می رود (Vaitkus, 2012) (Collop (Collop A., 2004) (Uzan, 1978)

مشابهت بیشتری میان شرایط آزمایشگاهی و شرایط واقعی به وجود می آورد (Raab C. P., 2004 b), (Collop A.C., 2009), (Santagata, 2012). دستگاه دیگری با فاصله ۵ میلیمتر بین دو فک نیز ارائه شده است که تحت نام Leutner اصلاح شده شناخته می شود (Collop A.C., 2009).

تجهیزاتی که توسط Miro در سال ۲۰۰۶ بکار برده شد LCB نام داشت. این دستگاه شرایط برش را مشابه با برش مستقیم به این نحو فراهم می ساخت که نمونه به صورت افقی قرار می گرفت و یکی از لایه ها درون فک متحرک دستگاه و دیگری درون فک ثابت محکم می شد. برش در ناحیه بین لایه ها رخ می داد و عملاً فاصله ای به میزان ۵ میلیمتر میان محل اتصال لایه ها لبه فک برای پیشگیری از بروز تنش های خمشی تعبیه شده بود (Miró R., 2006).

Gubler و همکاران در سال ۲۰۰۵ دستگاهی را ارائه کردند که توانایی اندازه گیری مقدار مقاومت برشی در شرایط مرطوب و خشک را دارد. این دستگاه، امکان آزمایش مقاومت برشی آسفالت در حالت مرطوب و خشک و با بارگذاری یکنواخت یا نوسانی را دارد. این آزمایش که در اصل به عنوان رقیبی برای آزمایش کشش غیر مستقیم (IDT) در ارزیابی خرابی رطوبتی آسفالت در نظر گرفته شده است، در ارزیابی مخلوطهای با دانه بندی باز نیز نتایج بسیار مناسبی از خود نشان داده است (Gubler, 2005). در سال ۲۰۰۵ مدلی عددی نیز توسط Solkov و همکاران برای آزمایش CAST توسعه داده شده است (Sokolov, 2005).

در سال ۲۰۱۱ از آزمایش با دستگاه CAST برای ارزیابی میزان تاثیر به هم پیوستگی برشی بین لایه های روسازی بر مقدار تغییر شکل قائم روسازی استفاده شد. این مجموعه آزمایش ها که بر اساس دو حالت مرزی "به هم پیوستگی کامل" و "جدایی کامل لایه ها" انجام گرفت با نتایج حاصل از آزمایش توسط LPDS مقایسه شد. یکی از مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق تاثیر بسیار زیاد دما بر مقدار به هم پیوستگی برشی بین لایه های مختلف روسازی است.

کیم و همکاران بر اساس این تحقیقات روسازی نتیجه گرفتند که روسازی چند لایه ای که در دمای پایتیر از ۲۰ درجه سانتیگراد کاملاً به هم پیوسته عمل می کرد، با افزایش دما از حالت "به هم پیوسته کامل" به حالت "کاملاً جدا از یکدیگر" مبدل می شود (Kim, 2011).

روی نمونه ها به همراه بارگذاری برشی نوسان، کنترل دمایی دقیق و سطح بزرگ اعمال برش فراهم بوده است. لذا در این تحقیق دستگاه AUT-SLT که در دانشگاه صنعتی امیرکبیر توسعه داده شده است به منظور ارزیابی نتایج تحت بارگذاری نوسانی مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج از نظر تکرار پذیری و منطقی بودن و همچنین انطباق بر نتایج پیشین مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-پیشینه تحقیق

تحقیقات بسیاری به منظور ارزیابی مقاومت برشی بین لایه های روسازی انجام گرفته اند که از این میان تنها معدودی از تحقیقات امکان بارگذاری نوسانی بر روی نمونه را فراهم نموده اند. در آلمان در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی Collop دستگاه آزمایش برش Leutner را توسعه داد که دستگاهی بسیار ساده با قابلیت اعمال تغییر مکان برشی به میزان ۵۰ میلیمتر بر دقیقه بود. این دستگاه که آزمایش ها خود را بر روی نمونه های استوانه ای انجام می داد نیروی برشی را اندازه گیری می کرد. بار قائم بر روی نمونه وارد نمی شد و نرخ کلی تنش برشی - تغییر مکان بیانگر افزایش نسبی دو متغیر بود (Collop A., 2004).

در سال ۲۰۰۴ Raab و همکارانش از این دستگاه به منظور ارزیابی های خود استفاده کردند (Raab C., 2004 a). Vatikus و همکاران در سال ۲۰۱۲ از دستگاه Leutner استفاده کردند که نشانگر آن بود که مقاومت برشی بین لایه های روسازی پس از به کارگیری ژئوگرید در حدود ۲۰ الی ۵۰٪ کاهش می یابد (Vaitkus, 2012).

در سال ۲۰۱۴ بر اساس آزمایش هایی که با این دستگاه توسط Jaskula انجام گرفت مشخص شد که تغییر نوع تک تک تاثیر قابل توجهی بر مقدار مقاومت برشی بین لایه های روسازی دارد (Jaskula, 2014).

دستگاه Leutner در سال ۲۰۰۴ با اعمال تغییراتی به دستگاهی به نام LPDS^۱ تغییر نام یافت و توسط برخی از محققین از جمله Raab و همکاران، Collop و همکاران، Santagata و همکاران مورد استفاده قرار گرفت. عمده این تغییر در نظر گرفتن فاصله ای ۲ میلیمتری بین دو فک اعمال بار بود. این فاصله به محل گسیختگی برشی در نمونه فرصت می داد تا به صورت انتخابی در نمونه رخ دهد و همچنین

کنسترتی در سال ۲۰۰۵ مقاومت برشی بین لایه‌ها را به وسیله دستگاهی موسوم به دستگاه تحقیقاتی و تحلیلی برش آنکونا^۶ (ASTRA) اندازه‌گیری کرد که جعبه برشی بود که قابلیت شبیه‌سازی شرایط واقعی بارگذاری روسازی را داشت و امکان اعمال بارهای قائم را در کنار بار برشی را فراهم می‌ساخت. در واقع در این دستگاه نمونه در دو نیمه جعبه قرار می‌گرفت که توسط محدوده‌ای کاملاً آزاد از هم جدا می‌شدند (Canestrari F., 2005). این دستگاه مشابهت بسیاری به دستگاه برش مستقیم مورد استفاده در مکانیک خاک دارد. در این دستگاه نمونه‌ای استوانه‌ای از آسفالت به گونه‌ای نصب می‌گردید که توسط دو نیم جعبه دستگاه امکان وارد آوردن تنش برشی بین سطحی وجود داشته باشد (Ferrotti G. C., 2012).

کنسترتی در ادامه تحقیقات خود در سال ۲۰۰۵ به بررسی میزان تاثیر دما بر رفتار برشی تک‌تک به کار رفته به منظور اتصال لایه روکش به روسازی آسفالتی پرداخت. در این تحقیق که به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت، آزمایش‌ها بر روی مشخصات شکست منطقه بین لایه‌ای صورت گرفت، بارهای قائم متفاوت در دماهای مختلف بر روی نمونه‌های دو لایه آسفالتی وارد گردید و میزان برش بین لایه‌ها توسط دستگاه ASTRA اندازه‌گیری شد (Canestrari & E., 2005). دستگاه [ASTRA] در بسیاری از تحقیقات توسط بسیاری از محققین مورد استفاده قرار گرفت. از جمله این تحقیقات می‌توان به آزمایش‌های انجام گرفته توسط Ferrotti در سال ۲۰۱۲ و همچنین تحقیقات انجام گرفته توسط Pasquini در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد (Ferrotti G. C., 2012). (Pasquini, 2012).

در سال ۲۰۰۸ دایاخته آزمایشگاهی را بر اساس نمونه‌های سه لایه و مبتنی بر آزمایش Double shear test انجام داد. این تحقیق با استفاده از بارگذاری نوسانی انجام گرفت. محققین معیار گسیختگی برشی را تعداد بار لازم برای افت ۵۰٪ در سختی اولیه در نظر گرفته بودند، در تحلیل‌های انجام گرفته به منظور درک بهتر از فرآیند تحلیل تا ۷۰٪ افت در سختی ادامه یافته است (Diakhaté, 2007).

در سال ۲۰۱۰ زامورا و همکارانش آزمایشی را جهت ارزیابی میزان مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی طراحی کردند که در آن امکان قرارگیری ژئوستتیک در میان دو لایه آسفالتی و

علاوه بر موارد ذکر شده، ویت در سال ۲۰۰۷ دستگاهی را طراحی کرد که در آن نمونه‌ها به صورت مایل تحت باری قائم قرار می‌گرفتند. در این حالت تنش برشی و قائم به صورت توأم عمل می‌کنند و مقدار هر یک با تغییر زاویه قرارگیری نمونه از ۰ تا ۴۵ درجه، قابل تغییر است.

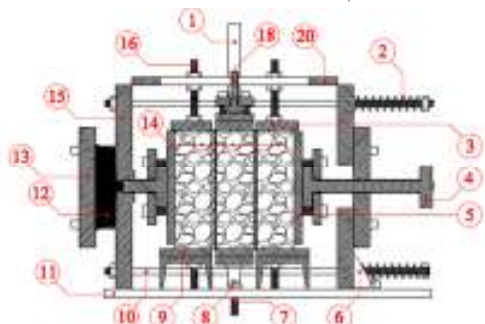
دستگاه مشابهی در سال ۲۰۱۳ توسط دیاندریا و همکاران ساخته شد که با نام SHSTM^۷ ارائه شده است. در تحقیقات ایشان این دستگاه برای اعمال بارگذاری نوسانی برشی بر روی نمونه آسفالت به کار برده شده است و بر اساس آن منحنی مربوط به جابجایی LVDT دستگاه UTM بدست آمده و نهایتاً بر اساس آن معادله رفتار میان لایه تحت بارگذاری برشی نوسانی ارائه شده است (D'Andrea, 2014).

دستگاهی را طراحی کرد که بار برشی و قائم را به صورت توأم و حتی به صورت نوسانی بر روی نمونه وارد می‌سازد. این دستگاه به منظور ارزیابی اتصال لایه‌های بتن غلتکی و آسفالت به کار برده شد. تاثیرات لنگر خمشی در اثر خروج از محوریت بار برشی توسط یک بازوی U شکل تأمین می‌گردید (Leng Z., 2008).

دستگاهی مشابه در سال ۲۰۱۵ توسط زوفکا و همکاران ارائه شد که با نام AST^۶ نامگذاری شد. با استفاده از این دستگاه تحت شرایط فاقد اتاکنک دمایی (در دمای محیط) و تحت سرعت بارگذاری ۱ mm/min و با بار قائم ۳ کیلونیوتن آزمایش‌هایی انجام گرفت. برای ثابت نگاه داشتن بار قائم وارد شده بر روی نمونه از سیستم بارگذاری پیچ و فنر استفاده شد به نحوی که افزایش بار توأم با جمع شدن فنر صورت می‌گرفت و در صورت اتساع نمونه کاهش چندانی در مقدار بار وارده بر روی نمونه مشاهده نمی‌شد (Zofka A., 2015).

بای آزمایشی را تحت نام LISST^۷ توسعه داد که توسط آن مقاومت بین لایه‌های روسازی ارزیابی می‌گردید. این دستگاه از یک قاب ثابت و یک قاب متحرک تشکیل شده است که تفاوت چندانی با دستگاه‌های برش مستقیم پیشین ندارد (Bae A., 2010). دو بست نمونه را درون قسمت ثابت نگاه می‌دارد. پارامترهایی که برای توصیف وضعیت میان لایه‌ها انتخاب شدند عبارت از مدول تانژانت میان لایه و بیشینه تنش برشی میان لایه هستند (Bae A., 2010).

می‌گردد. (نوری، ع.، مقدس نژاد، ف.، و خدایی، ع. (۱۳۹۳))، با توجه به جدا بودن بخش بارگذاری قائم از دستگاه و اتصال آن به دستگاه توسط دو پیچ تنظیم دستی، امکان تنظیم محل قرارگیری نمونه و اعمال بارگذاری بر روی میان لایه‌ها به نحوی دقیق فراهم شده است.



شکل ۱. برشی طولی از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی آسفالتی

همچنین با توجه به تعبیه کلاهک دستگاه، نمونه به نحوی بسیار دقیق و در محل وجود میان لایه دچار برش شده و این اطمینان را فراهم می‌سازد که مقدار اندازه‌گیری شده حاصل از مقاومت برشی در بخش بین لایه‌ها است.

با توجه به بکارگیری دستگاه بارگذاری عمومی UTM (که در عموم دانشگاهها موجود است)، دستگاه با هزینه ای معادل یک دهم دستگاه‌های مشابه که سیستم بارگذاری برشی و اندازه‌گیری آن بر روی خود دستگاه تعبیه شده است قابل ساخت است و همچنین دقت بسیار بالایی در بارگذاری و سنجش میزان مقاومت برشی توسط دستگاه تأمین می‌گردد. این موضوع به محققین داخلی این فرصت را می‌دهد که با پرداخت هزینه بسیار کمتر به کارآیی بیشتر دست یابند.

به منظور استفاده از این دستگاه کفایت نمونه را درون آن قرار داده و دستگاه درون محفظه دستگاه تست عمومی UTM-25 قرار گیرد و میله بارگذاری به دستگاه متصل گردد. دستگاه در شکل ۲ مشاهده می‌گردد.

سپس دما را تنظیم کرده و جهت اعمال بارگذاری قائم پیچ بارگذاری قائم دستگاه چرخانده می‌شود تا صفحه پشت پیچ در پی آن فنرهای بارگذاری دستگاه حرکت کرده و فنرها جمع شوند و بار قائم به میزان مورد دلخواه برسد. (توجه گردد که منظور از بار قائم در تمامی این مستند باری است که به صورت قائم بر روی روسازی آسفالتی وارد می‌شود که به منظور توانایی شبیه‌سازی توسط دستگاه UTM نمونه‌ها به میزان ۹۰

آزمایش برش بر روی آن فراهم بود و توسط آن ارزیابی‌هایی را بر روی مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی با تعبیه ژئوستتیک و بدون تعبیه ژئوستتیک انجام دادند (Zamora-Barraza, 2010).

در آزمایش‌های انجام شده توسط زامورا سه نوع ژئوگرید و دو نوع ژئوتکستایل مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین دو نوع تک‌ت رایج در کشور اسپانیا در این تحقیق استفاده گردیده است (Zamora-Barraza, 2010).

یکی از نکات مثبت شیوه پیشنهادی Zamora آن است که تنش نهایی به دست آمده از نمونه مجموع تنش برشی وارد بر طرفین لایه وسطی است که با تقسیم آن بر ۲ می‌توان با انجام تنها یک آزمایش به مقدار میانگین تنش برشی حاصل از دو آزمایش دست یافت (Zamora-Barraza, 2010).

بر اساس تحقیقات پیشین دستگاههایی که امکان ارزیابی مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی را دارند، طیف وسیعی را تشکیل می‌دهند که از این میان تنها شمار معدودی از دستگاهها امکان اعمال توام بارگذاری نوسانی و بارگذاری قائم را در عین کنترل دمایی داشته‌اند (دستگاه ابداع شده توسط Al-qadi و همچنین دستگاه ابداع شده توسط Zofka).

بر این اساس اهداف این پژوهش به شرح زیر تعریف گردید:

الف: طراحی و ساخت دستگاه AUT-SLT به نحوی که امکان اعمال بارگذاری برشی نوسانی را توام با بارگذاری قائم و کنترل دمایی دقیق داشته باشد.

ب: سنجش میزان انطباق فرم نمودارها با آنچه که پیش از این توسط محققینی همچون Diakhte ارزیابی شده بود.

ج: کنترل تکرار پذیری آزمایشها

۳- دستگاه مورد استفاده به منظور اندازه‌گیری

مقاومت برشی بین لایه‌ها

با توجه به این که دستگاهی با قابلیت اندازه‌گیری مقاومت برشی بین لایه‌های آسفالت تحت بارگذاری یکنواخت و نوسانی در کشور وجود نداشت، دستگاهی با عنوان "دستگاه سنجش مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی تقویت شده با ژئوستتیک (AUT-SLT)" در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شد و با مالکیت تیم تحقیقاتی و دانشگاه صنعتی امیرکبیر ثبت گردید که در شکل ۱ مشاهده

$$K_s = \frac{L \times F_k}{A \times d_k} \quad (1)$$

در هر ۲۵۰ میلی ثانیه یک بار برداشت اطلاعات انجام پذیرفت و با استفاده از مقدار نیروی اعمال شده در این بازه برداشت و مقدار جابجایی حاصل مقدار K_s در این بازه برداشت محاسبه گردید. مقدار K_s برای ۱۰٪، ۳۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪ و ۹۰٪ افت نسبت به K_s اولیه در نظر گرفته شد و تعداد بارگذاری لازم جهت رسیدن به هر یک از درصد افتهای مذکور محاسبه گردید تا امکان ارزیابی افت سختی در برابر تعداد بارگذاری (همانند آنچه که در شکل ۵ و شکل ۶ مشاهده می شود) فراهم گردد. تعداد بارگذاری لازم برای هر میزان افت در سختی اولیه برای نمونه های فاقد قیر در جدول ۱ و تعداد بارگذاری لازم برای افت در سختی اولیه برای نمونه دارای 0.8 kg/m^2 قیر در جدول ۲ ارائه شده است. در این دو جدول مقادیر میانگین و ضریب تغییرات به همراه آزمایش نرمالیتی به شیوه اندرسون دارلینگ و همچنین آزمون تکرار پذیری آزمایش به شیوه ANOVA نیز ارائه شده است.

علاوه بر تکرار پذیری آزمایش، گرافهای آزمایش های انجام گرفته توسط Diakhate نیز مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به متفاوت بودن نمونه ها انطباق تحقیق حاضر و تحقیق انجام گرفته توسط Diakhate امکان پذیر نبود. اما فرم نمودارها و روند آنها شباهت به نمودارهای ارائه شده توسط Diakhate داشت (Diakhaté, 2007).

گرافهای حاصل از تحقیق حاضر، در شکل ۵ و شکل ۶ ارائه شده اند. همان گونه که در این نمودارها مشاهده می شود، فرم اصلی گرافهای آزمایش به نحوی است که از سه بخش اصلی تشکیل یافته اند. در ابتدای آزمایش و در مرحله اول تغییر شکلهای وارده عموماً به دلیل فشرده شدن و تغییر در درصد فضای خالی موجود در مخلوط آسفالتی است.

در بخش دوم افت در مقدار سختی مخلوط به نحوی تقریباً یکنواخت رخ می دهد و نهایتاً در مرحله سوم نمونه به شدت دچار افت در میزان سختی می شود.

گرافهای ارائه شده در این تحقیق مشابهت کامل با گرافهای ترسیم شده توسط محققین پیشین دارند، با این وجود به دلیل عدم ارائه مشخصات دقیق برای مصالح در مرور ادبیات تحقیق، همانگونه که بیان شد، امکان ارزیابی و مقایسه دقیق نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققین وجود نداشته است (Diakhaté, 2007).

درجه چرخیده و باری که به صورت قائم بر روی روسازی در محل وارد می گردد در این آزمایش به شکل افقی بر روی نمونه وارد می شود.

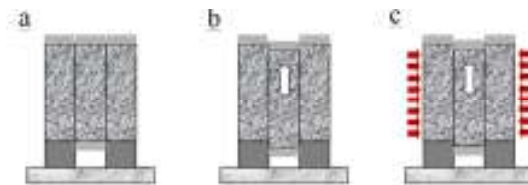


شکل ۲. نمایی از دستگاه اندازه گیری مقاومت برشی بین لایه های روسازی

۴- کنترل نتایج مقاومت برشی تحت بارگذاری

نوسانی

جهت ارزیابی عملکرد دستگاه تحت بارگذاری نوسانی، بخش متحرک نمونه توسط بازوی بارگذاری دستگاه UTM تحت بارگذاری نوسانی قرار گرفت. این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در داده های موجود در تحقیقات پیشین نتایج دقیق از انجام این آزمایش به دست نیامده است و صرفاً به ارائه گراف اکتفا شده است، مشابهت فرم گراف با فرم آزمایشهای انجام شده تایید شد و سپس مقایسه میان نتایج حاصل از تکرار آزمایش مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳. تصویر شماتیک از نحوه انجام آزمایش برش دو طرفه تحت بارگذاری نوسانی

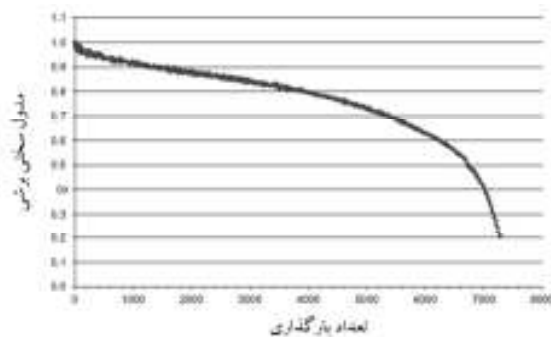
در این نوع بارگذاری همانگونه که از نام آن بر می آید، بارگذاری به شیوه نوسانی صورت می گیرد. بارگذاری در این آزمایش از نوع نیم سینوسی است و به منظور آزمایش کارکرد دستگاه از فرکانس ۱ Hz و مقدار بار ۴ kN استفاده شد. مقدار سختی برشی میان لایه در هر مرحله بر اساس فرمول (۱) به دست آمد. در این فرمول F_k مقدار نیروی وارد شده بر لایه میانی و d_k مقدار جابجایی لایه میانی نمونه است.

جدول ۱. نتایج حاصل از تکرار آزمایش مقاومت برشی تحت بارگذاری فاقد قیر

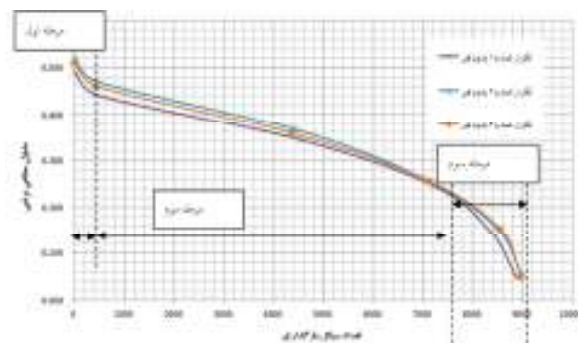
شماره گروه	شماره تکرار	سختی اولیه (گیگا پاسکال)	تعداد بار لازم برای افست ۱۰٪	تعداد بار لازم برای افست ۳۰٪	تعداد بار لازم برای افست ۵۰٪	تعداد بار لازم برای افست ۷۰٪	تعداد بار لازم برای افست ۹۰٪
۱	تکرار شماره ۱	۰/۵۱۲	۴۲۱	۴۳۵۱	۷۱۲۴	۸۵۴۲	۸۹۵۲
۲	تکرار شماره ۲	۰/۵۲۴	۴۱۵	۴۴۲۱	۷۰۲۸	۸۶۶۷	۸۹۷۳
۲	تکرار شماره ۳	۰/۴۹۲	۴۳۹	۴۵۴۱	۷۲۱۵	۸۳۵۲	۸۵۷۸
میانگین		۰/۵۱	۴۲۵	۴۴۳۷/۳۷	۷۱۲۱	۸۴۵۴	۸۹۳۱
انحراف معیار		۰/۰۲	۱۲/۴۹	۹۶/۰۹	۹۵/۵۴	۹۵/۷۷	۶۵/۰۹
ضریب تغییرات		۳/۱۹	۲/۹۴	۲/۱۷	۱/۳۴	۱/۱۳	۰/۸۳
Anderson-Darling P-Value		۰/۵۳۶	۰/۳۳۴	۰/۵۲۸	۰/۶۲۷	۰/۵۵۳	۰/۳۳۰
استنباط		نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال
ANOVA (P-value)		۰/۹	۰/۸۲	۰/۴۲	۰/۹	۰/۴۱	۰/۸
استنباط		تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری

بر اساس فرض رایج در تحقیقات پیشین تعداد تکرار بار لازم برای شکست برشی میان لایه برابر با تعداد تکرار بار لازم برای افست ۵۰٪ در سختی برشی اولیه در نظر گرفته شده است (Diakhate, 2006).

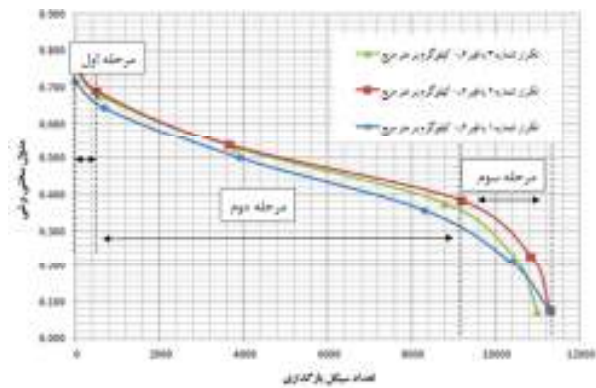
در این تحقیق برای نشان دادن تعداد بار لازم برای شکست از علامت اختصاری N_f استفاده می شود.



شکل ۴. نمونه‌ای از گراف‌های به دست آمده توسط Diakhate و همکاران (Diakhate, 2007)



شکل ۵. نتایج تکرار آزمایش بارگذاری برشی نوسانی بر روی نمونه‌های بدون تک‌کت



شکل ۶. نتایج تکرار آزمایش بارگذاری برشی نوسانی بر روی نمونه‌های با مقدار تک کت ۰/۷ kg/m2

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشها و تحلیلهای آماری انجام گرفته بر روی داده‌های آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل می‌گردد:

الف: دستگاه AUT-SLT نتایجی منطبق بر نتایج پژوهشهای پیشین ارائه می‌نماید و نمودارهای افت سختی برشی اولیه حاصل از آزمایش توسط این دستگاه مشابهت زیادی با داده‌های حاصل از پژوهش انجام گرفته توسط دایخته دارد.

ب: در این نمودارها سه مرحله اصلی مشاهده می‌گردد که در ابتدای آزمایش و در مرحله اول تغییر شکلهای وارده عموماً به دلیل فشرده شدن و تغییر در درصد فضای خالی موجود در مخلوط آسفالتی است. در بخش دوم افت در مقدار سختی مخلوط به نحوی تقریباً یکنواخت رخ می‌دهد و نهایتاً در مرحله سوم نمونه به شدت دچار افت در میزان سختی می‌شود. ج: تکرار آزمایش بیانگر انطباق نمودارهای تکرار شده آزمایشها است و تکرارپذیری آزمایشها علاوه بر انطباق نمودارها با استفاده از آزمون آنالیز واریانس نیز اثبات گردید. مقادیر P-value بالاتر از ۰/۰۵ بیانگر آن است که فرض معنادار بودن تفاوتها از نظر آماری بی معنا است و بنابراین تفاوتهای نمودارها در نقاط بررسی شده بی معنا است.

د: بر اساس موارد اشاره شده فوق می‌توان از آزمایش توسط دستگاه AUT-SLT به عنوان آزمایشی تکرار پذیر و قابل اعتماد برای یافتن مقادیر افت سختی برشی در نمونه‌های روسازی تقویت شده توسط ژئوسنتتیک استفاده نمود.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1.Layer-Parallel Direct Shear
- 2.Indirect tensile test
- 3.Fully bonded
- 4.No-bonding
- 5.Sapienza Horizontal Shear Test
- 6.Advanced shear test
- 7.Interlayer Shear Strength Tester
- 8.Ancona Shear Testing Research and Analysis
- 9.Amirkabr university of technology shear laboratory test

جدول ۲. نتایج حاصل از تکرار آزمایش مقاومت برشی تحت

بارگذاری با مقدار تک‌تک ۰/۶ کیلوگرم بر متر مربع

شماره گروه	شماره تکرار	سختی اولیه (گیگا پاسکال)	تعداد بار لازم برای افت ۱۰٪	تعداد بار لازم برای افت ۳۰٪	تعداد بار لازم برای افت ۵۰٪	تعداد بار لازم برای افت ۷۰٪	تعداد بار لازم برای افت ۹۰٪
۱	تکرار شماره ۱	۰/۷۱۶	۶۸۴	۳۹۱۲	۸۳۱۵	۱۰۳۳۵	۱۱۳۲۸
۲	تکرار شماره ۲	۰/۷۶۸	۴۹۸	۳۶۵۸	۹۱۹۹	۱۰۳۷۱	۱۱۲۹۵
۳	تکرار شماره ۳	۰/۷۵۶	۵۵۴	۳۸۲۴	۸۷۹۲	۱۰۴۴۵	۱۰۹۸۷
میانگین		۰/۷۵	۵۷۸/۶۷	۳۷۹۸	۸۷۶۸/۶۷	۱۰۵۵۱/۳۷	۱۱۲۰۳/۳۳
انحراف معیار		۰/۰۳	۹۵/۴۲	۱۲۸/۹۸	۴۴۲/۴۶	۲۵۷/۱۶	۸۸/۰۸
ضریب تغییرات		۳/۶۵	۱۶/۴۹	۳/۴	۵/۰۵	۲/۴۴	۱/۶۸
Anderson-Darling P-Value		۰/۳۰۰	۰/۴۲۸	۰/۵۰۷	۰/۶۲۰	۰/۲۰۰	۰/۱۱۹
استنباط		نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال
ANOVA (P-value)		۰/۱۴۱	۰/۱۹۰	۰/۴۴۵	۰/۳۰۴	۰/۵۶۷	۰/۶۱۱
استنباط		تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری	تکرار پذیری

- Collop A.C., S. M. (2009), "Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores". pp.23.
- D'Andrea, A. T. (2014), "Interface roughness parameters and shear strength". 7 (1-10. doi:10.5539/mas.v7n10p1).
- Diakhaté, M. (2007), "Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussées".
- Diakhate, M. P. (2006), "Shear fatigue behaviour of tack coats in pavements". (7) pp.201-222.
- Donovan, E. P & .Al-Qadi, I. (2000), "Optimization of Tack Coat Application Rate for Geocomposite Membrane on Bridge Decks1740.
- Ferrotti, G. C. (2011), "A strategic laboratory approach for the performance investigation of geogrids in flexible pavements. pp.25 (5).
- Ferrotti, G. C. (2012), "Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements". pp.34.
- Freeman, T. J., Button, J. W & .Estakhri, C. K. (2010), "Effective prime coats for compacted pavement bases". Austin: Texas Department of Transportation.
- Gubler, R. P. (2005), "Influence of water and temperature on mechanimechanical properties of selected asphalt pavements. (38), pp.523-532. doi:10.1617/14317.
- Jaskuła, P. (2014), "Influence of compaction effectiveness on interlayer bonding of asphalt layers". The 9th international conference "Environmental Engineering.
- Kim, H. A. (2011), "Numerical and experimental analysis for the interlayer behavior of double-layered asphalt pavement specimens. 23(1) (12-20. doi:10.1061).
- نوری، ع.، مقدس نژاد، ف.، و خدایی، ع. (۱۳۹۳)، "دستگاه سنجش مقاومت برشی دینامیکی بین لایه‌های روسازی تقویت شده با ژئوستتیک". تهران: سازمان ثبت اسناد و املاک کشور، قوه قضاییه جمهوری اسلامی ایران.
- Ahn, H. (2012), "Pull-off Test for Evaluation of Asphalt Pavement Interface. West Lafayette, Indiana: Annual Transportation Research Board Meeting and publication in the Journal of the transportation Research Board".
- Al-Qadi, I., Qasim Hasiba, K. I. (2012), "Development of a testing approach for tack coat application rate at pavement layer interfaces".
- Bae A., M. L. (2010), "Effects of Temperature on Interface Shear Strength of Emulsified Tack Coats and Its Relationship to Rheological Properties". Journal of the Transportation Research Board, No.2180
- Baek, J. (2010), "Modeling reflective cracking development in hot mix asphalt overlays and quantification of control techniques". Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Canestrari F., F. G. (2005), "Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance". Journal of the Transportation Research Board, No. 1929.
- Canestrari, F., & E., S. (2005), "Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements". 6 (1).
- Chen, J. (2010), "Effect of Surface Characteristics on Bonding Properties of Bituminous Tack Coat". Journal of the Transportation Research Board, (No. 2180).
- Collop A., T. N. (2004), "Assessment of Bond Condition Using the Leutner Shear Test". Vol. 156, (No.4).

- Sutanto, M. H. (2009), "Assessment of bond between asphalt layers." Nottingham: Thesis submitted to the university of Nottingham for the degree of Ph.D.
- Tashman L., N. K. (2006), "Evaluation of the Influence of Tack Coat Construction Factors on the Bond Strength between Pavement Layers". USA: Report Prepared for Washington State Department of Transportation.
- Tschegg, E. K.-T. (1995), "Investigation of Bonding between Asphalt Layers on Road Construction".
- Uzan, J. L. (1978), "Investigation of Adhesion Properties between Asphaltic Concrete layers". Technical Sessions, Vol. 47.
- Vaitkus, A. D. (2012), "Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures". Lithuania: Gradevinar.
- West, R. M. (2004), "Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers".
- Wheat, M. (2007), "Evaluation of bond strength at asphalt interlayers". Manhattan, Kansas: US Department of Transportation.
- Zamora-Barraza, D. C.-P.-F.-Z. (2010), "New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture". (28) pp.483-489.
- Zofka A., M. M. (2015), "Advanced shear tester for evaluation of asphalt concrete under constant normal stiffness conditions". (16) pp.187-210.
- Kucharek, A. J., (2010), "Determination of Factors Affecting Shear Testing Performance of Asphalt Emulsion Tack Coats.
- Leng Z., O. H.-Q. (2008), "Interface Bonding Between Hot-Mix Asphalt and Various Portland Cement Concrete Surfaces". No. 2057.
- Miró R., M. A. (2006), "Evaluation Of The Effect Of Heat-Adhesive Emulsions For Tack Coats With Shear Test From The Road Research Laboratory Of Barcelona". Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Ozer H., A.-Q. I.(2008), "Fracture-Based Friction Model for Pavement Interface Characterization", pp.2057.
- Pasquini, E. M. (2012), "Laboratory characterisation and field validation of geogrid-reinforced asphalt pavements". pp.14 (1).
- Raab, C. (2004 a), "Interlayer shear performance :Experience with different pavement structures". Dübendorf,Switzerland: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna.
- Raab, C. P. (2004 b), "Effect of tack coats on interlayer shear bond of pavements".
- Raab, C. P.(1999), "Methoden zur beurteilung des schichtenverbunds von asphaltbelagen.
- Salinas A., A.-Q. I. (2013),"Interface layer tack coat optimization. 2372, pp.53-60.
- Santagata, F. A. (2012), "Statistical investigation of two different interlayer shear test methods". 42, pp.705-714.
- Sholar, G. A.(2004), "Bond strength of bituminous tack coats (73)", pp.771-806.
- Sokolov, K. G. (2005), "Extended numerical modeling and application of the coaxial shear test for asphalt pavements". 38, pp.515–522.