

# توسعه یک مدل ریاضی برای تعیین ارزش سازه‌ای ژئوتکستایل‌های مورد استفاده در ایران

محمود عامری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
جلیل شاهی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حامد خانی سانجی\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران و عضو هیئت علمی،  
پژوهشکده حمل و نقل، تهران، ایران

E-mail: khani@iust.ac.ir

دریافت: ۸۹/۰۷/۲۷ - پذیرش: ۸۹/۱۲/۰۹

## چکیده

در چند دهه اخیر استفاده از ژئوتکستایل‌ها جهت کاهش ضخامت روکش آسفالتی مورد توجه محققین قرار گرفته است. بنابراین تعیین ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل<sup>۱</sup> در روسازیها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. روش اندازه‌گیری افت و خیز ضربه‌ای ( $FWD^2$ ) متداول‌ترین روش غیرمخرب ارزیابی سازه روسازی است. در این پژوهش برای ارزیابی ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل، ۱۲ قطعه، هر کدام با طول در حدود ۱۵۰ متر در جاده قدیم قم- تهران مورد مطالعه میدانی قرار گرفتند. در هر یک از این قطعه‌ها در دو مرحله (قبل و بعد از اجرای لایه روکش) و در هر مرحله حداقل ۱۲ مورد آزمایش افت و خیز ضربه‌ای انجام شد و با نتایج آنها ضخامت روکش تعیین گردید. با استفاده از داده‌های آزمایش افت و خیز ضربه‌ای در پنج قطعه از جنس آسفالت، مدلی برای ارزیابی سازه‌ای روکش آسفالتی برای نخستین بار در این زمینه ایجاد گردید. در ۷ قطعه دیگر انواع میان لایه‌های ژئوتکستایل ایرانی و خارجی که در کشور کاربرد بیشتری داشتند اجرا شدند و با استفاده از مدل به دست آمده، ارزش سازه‌ای آنها مشخص شد. بر اساس نتایج این پژوهش میانگین ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل برابر ۲/۹۲ سانتیمتر ضخامت آسفالت گرم است، در حالی که این میانگین برای ژئوتکستایل‌های ایرانی برابر با ۲/۴۷ سانتیمتر است.

واژه‌های کلیدی: مصالح ژئوتکستایل، دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای، ارزش سازه‌ای

## ۱. مقدمه

احداث جاده بر روی زمینهای سست و کم مقاومت استفاده زیادی می‌شود [Barnhart, 1989]. در دو دهه اخیر استفاده از این مصالح در لایه‌های روسازی بسیار رایج و به تبع آن سؤالات گوناگونی مطرح شده است. اینکه آیا مصالح ژئوتکستایل ارزش سازه‌ای دارند و آیا استفاده از آنها با توجه به دوام روسازی مقرون به صرفه است یا خیر، از جمله سؤالاتی است که در صنعت روسازی بسیار مطرح است. برای پاسخ به این پرسشها تحقیقات بسیاری در کشورهای جهان انجام شده است. در این

در چند دهه اخیر با رشد فنآوری، مواد پلیمری مختلفی برای استفاده در روسازی و افزایش بهره‌وری آن تولید و به بازار عرضه شده‌اند. برخی از این مواد پلیمری ژئوستنتیکهایی موسوم به ژئوتکستایل هستند. در فنآوری نوین امروزی با استفاده از مواد پلیمری، یافی با مقاومت کششی بسیار زیاد تولید می‌گردند که در کارخانجات نساجی برای تهیه ژئوتکستایلها استفاده می‌شوند. این تولیدات در روسازیهای آسفالتی کاربرد زیادی دارند [پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۶]. از ژئوستنتیکها برای کمک به

ژئوتکتستایل فقط در مواردی مقرون به صرفه و بهینه است که ضخامت روکش آسفالتی که بر روی این محصولات اجرا می‌شود بیشتر از ۴ سانتیمتر باشد.

اسپراگو<sup>۸</sup> در سال ۲۰۰۶ چند پروژه که در سالهای ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۷ در بخش گریندیل<sup>۹</sup> ایالت کارولینای جنوبی اجرا شده بودند را با ارزیابی شرایط موجود روسازی مورد بررسی قرار داد. این مطالعه دارای دو فاز بود که در فاز اول ۳۴ قطعه و در فاز دوم ۳۷ قطعه مورد بررسی قرار گرفت و هر دو فاز دارای نتایج یکسانی بودند. این مطالعه نشان داد که استفاده از مصالح ژئوتکتستایل به همراه روکش آسفالتی گرم در مقایسه با دیگر جایگزینهای موجود در این زمینه از بُعد اقتصادی توجیه‌پذیر است.

در این مطالعه شرایط موجود روسازی از صفر تا ۱۰۰ امتیازدهی گردید. این مطالعه نشان داد در مواقعی که امتیاز شرایط موجود روسازی از ۲۵ کمتر باشد بازیافت سرد و لکه‌گیری قبل از اجرای مصالح ژئوتکتستایل و اجرای لایه روکش، اقتصادی‌ترین گزینه است و برای شرایطی که امتیاز روسازی بین ۲۵ تا ۵۰ باشد، اجرای مصالح ژئوتکتستایل به همراه ۴ تا ۵ سانتیمتر روکش آسفالت گرم اقتصادی‌ترین گزینه است. برای حالتی که امتیاز روسازی بالاتر از ۵۰ باشد اجرای روکش با و بدون مصالح ژئوتکتستایل در هر دو حالت مناسب و اقتصادی است [Sprague, 2006].

به طور خلاصه، مطالعات پیشین نشان‌دهنده ارزش سازه‌ای میان لایه‌های ژئوتکتستایل در حد ضخامتی معادل با ۲/۵ تا ۴/۵ سانتیمتر آسفالت گرم است. این مطالعات خاطر نشان می‌کنند که در برخی شرایط، اجرای روکش آسفالتی به همراه میان لایه‌های ژئوتکتستایل اقتصادی‌ترین گزینه است. به طور کلی برآیند کلیه مطالعات انجام شده، کاربرد مصالح ژئوتکتستایل را به عنوان میان لایه در زیر لایه روکش آسفالتی با در نظر گرفتن موارد فنی مورد تأیید قرار می‌دهد [Young, Sung and Kwang, 2009]. برای کاربرد مناسب و بهینه محصولات ژئوتکتستایل ضخامت روکش آسفالتی باید در محدوده خاصی باشد که حداقل آن ۵ سانتیمتر است. مطالعات خارجی انجام شده برای تعیین ارزش سازه‌ای میان لایه‌های ژئوتکتستایل با استفاده از آنالیز چرخه عمر و بررسی روند گسترش خرابیها بوده است، ولی با توجه به عدم وجود تاریخچه اجرا و در دسترس نبودن اطلاعات آماری، این مورد در ایران عملی نبوده و در این پژوهش با ابداع روشی جدید و

پژوهش سعی شده است که با احداث یک جاده آزمایشی و استفاده از انواع مختلف ژئوتکتستایلهای وارداتی و تولیدات داخلی ارزش سازه‌ای این محصولات در لایه‌های روسازی بررسی و به سؤالات مطرح شده پاسخ داده شود.

## ۲. مروری بر مطالعات پیشین

یافته‌های هاتس<sup>۳</sup> و تحقیقات سازمان حمل و نقل و راهداری ایالت کالیفرنیا در دهه ۹۰ نشان داده‌اند که عملکرد یک میان‌لایه ژئوتکتستایل، معادل عملکرد حدود ۳ سانتیمتر روکش آسفالتی است. براساس همین بررسی، هزینه اجرای یک لایه ژئوتکتستایل معادل ۵۰ درصد هزینه اجرای یک لایه روکش آسفالتی به ضخامت ۳ سانتیمتر است [Holtz, Christopher, Berg, 1998].

به منظور توجیه اقتصادی استفاده از ژئوتکتستایلهای، برخی پژوهشگران، کاهش ضخامت روکش را براساس ضخامت هم‌ارز<sup>۳</sup> در نظر می‌گیرند. تحقیقات اولیه‌ای که توسط پرودل<sup>۴</sup> انجام شد، نشان داد که استفاده از یک لایه ژئوتکتستایل قبل از اجرای لایه روکش، معادل ضخامت ۲/۵۴ سانتیمتر آسفالت گرم است [Predoehl, 1990].

کارمیشل<sup>۶</sup> و ماریفلد<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۹ هزینه استفاده از یک میان لایه ژئوتکتستایل را معادل هزینه ۱/۲۷ سانتیمتر آسفالت گرم برآورد کردند، اما ضخامت هم‌ارزی که برای استفاده از این محصولات برآورد کردند، برابر با ۳/۳ سانتیمتر آسفالت گرم به دست آمد [Carmichael, Marienfeld, 1999]. براساس یافته‌های این پژوهشگران روکشهای آسفالتی (با و بدون ژئوتکتستایل) با ضخامت کمتر از ۵ سانتیمتر، مستعد بروز ترک‌خوردگیهای زودرس در روسازی هستند [Button and Lytton, 2007]. طی مطالعات فوق مشخص شد که استفاده از ژئوتکتستایلهای در بهسازی روسازی باعث افزایش دوام و عمر روسازی شده و دوره بهره‌برداری از آن را در حد ضخامتی معادل با ۲/۵ تا ۴/۵ سانتیمتر آسفالت گرم افزایش می‌دهد. این پژوهشگران نشان دادند که هزینه تهیه و نصب و اجرای یک میان لایه ژئوتکتستایل در روسازی برابر با هزینه تهیه، حمل، پخش و اجرای ۱/۵ سانتیمتر آسفالت گرم است. علاوه بر آن این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که استفاده از میان لایه

خاکی و یک لایه تفکیک بودند) و لایه‌های آسفالتی بود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

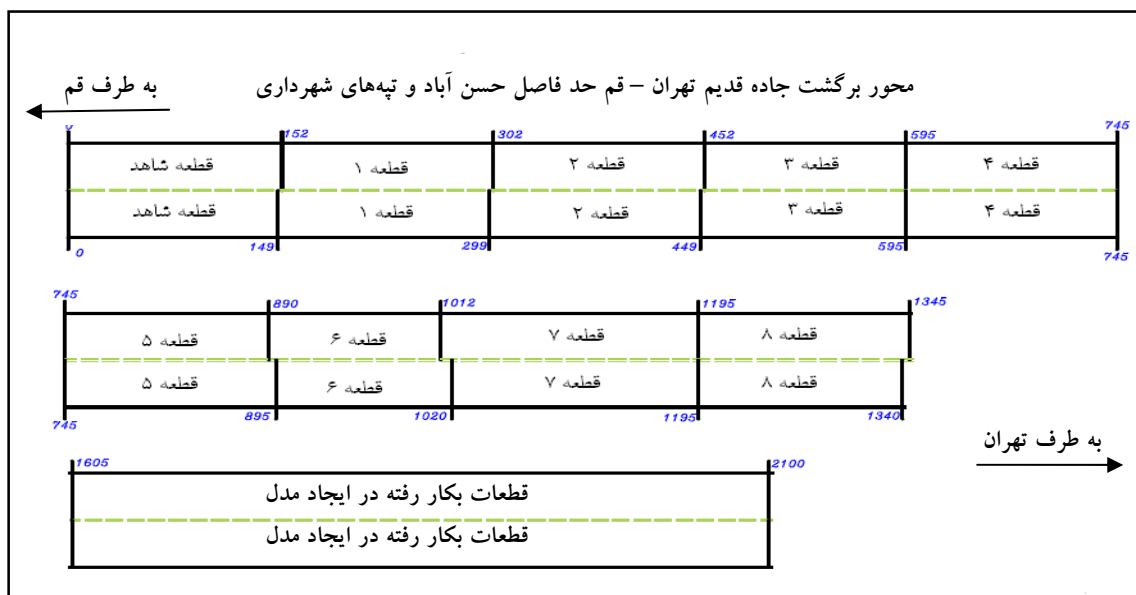
ارزیابی روسازی قبل و بعد از اجرا توسط آزمایش افت و خیز ضربه‌ای ارزش سازه‌ای میان‌لایه‌های ژئوتکستایل تعیین شده است.

### ۳-۱ اجرا

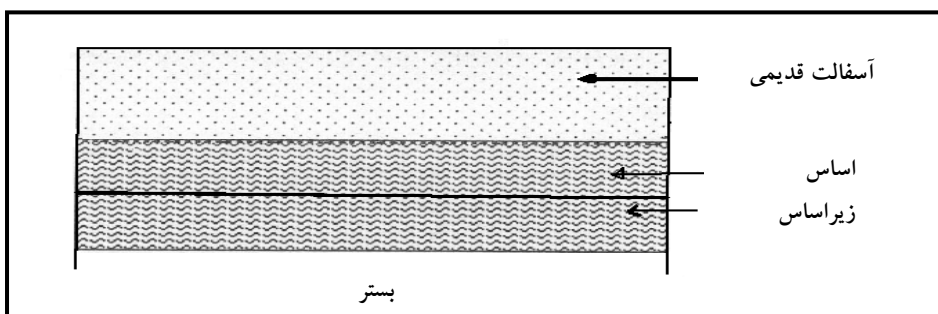
نمونه‌گیری‌های انجام شده نشان دهنده تغییر در ضخامت آسفالت موجود و لایه‌های زیرین در مسیر مورد مطالعه است، به همین دلیل ضخامت لایه‌ها در شکل ۲ درج نشده است. اجرای لایه‌های ژئوتکستایل مطابق با نظر تولید کننده مصالح ژئوتکستایل انجام شده است و دانه‌بندی لایه روکش مطابق با دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور است که در شکل ۳ نشان داده شده است. قیر مورد استفاده در لایه روکش، قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان است که نتایج آزمایش‌های موجود در طرح اختلاط نشان دهنده همخوانی مشخصات آن با حدود رواداریهای نشریه ۱۰۱ است.

### ۳. محل انجام تحقیق

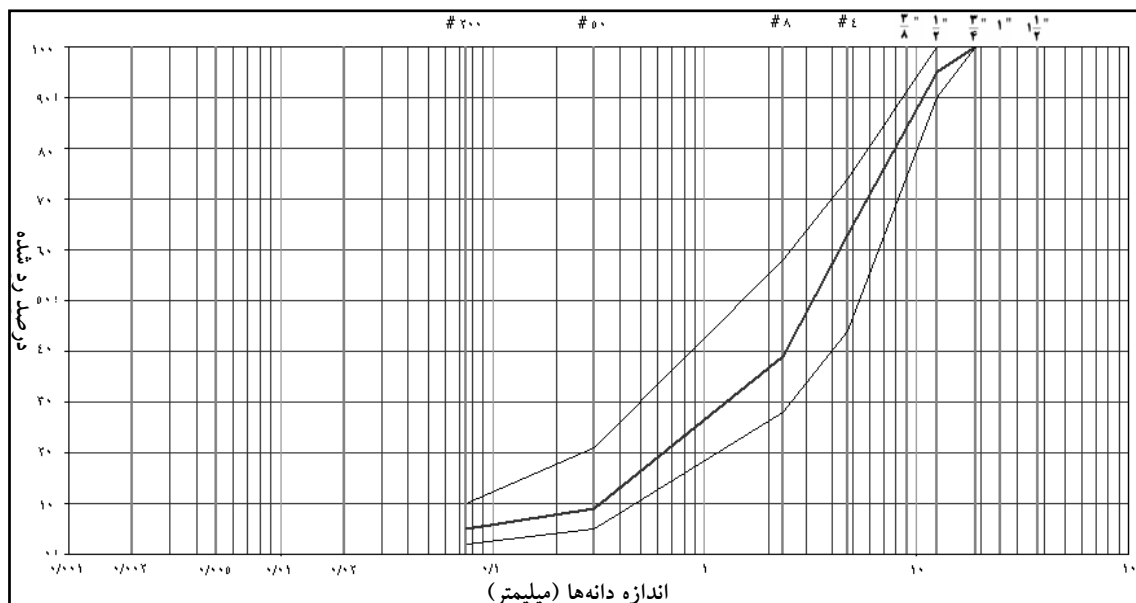
برای ارزیابی مصالح ژئوتکستایل، ۷ قطعه با میان لایه ژئوتکستایل و یک قطعه با روکش آسفالت گرم خالص معمولی به عنوان قطعه شاهد و ۴۹۵ متر مسیر برای ایجاد مدل در بخشی از مسیر جاده قدیم تهران- قم مورد ارزیابی قرار گرفت (قطعات بکار رفته برای ایجاد مدل ۵ قطعه هستند). محل قرارگیری این قطعات در شکل ۱ نشان داده شده است. ابتدا و انتهای این قطعات در جدول ۱ براساس کیلومتر ابتدایی مسیر پروژه ذکر شده است. مقطع روسازی قبل از اجرا مشتمل بر لایه بستر خاکی و یک لایه اساس و زیراساس (این دو لایه در بسیاری بستر



شکل ۱. محل قطعات میدانی مورد مطالعه در مسیر جاده قدیم تهران- قم



شکل ۲. مقطع روسازی قبل از اجرای روکش و میان لایه



شکل ۳. دانه‌بندی مخلوط آسفالتی لایه روکش

#### ۴. انجام آزمایش غیرمخرب و ارائه مدل

آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای به منظور طراحی روکش در قطعات آسفالت خالص از کیلومتر ۱+۶۰۵ تا ۲+۱۰۰ برای ارائه مدل برای تعیین ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل، قبل و بعد از اجرای روکش و میان لایه ژئوتکستایل مطابق با مندرجات استاندارد [ASTM D4694-07, Holtz, Christopher, and Berg, 1998] انجام شد. براساس روش ارائه شده در اشتو، ۱۹۹۳، مدول ارتجاعی کل روسازی ( $E_p$ ) و عدد ضخامت مؤثر کل روسازی  $SN_{eff}$ ، توسط روابط ۱ و ۲ برای هر آزمایش به‌دست آمد و سپس توسط رابطه ۳ ضخامت روکش محاسبه گردید [Predoehl, 1990]. به این ترتیب، براساس اطلاعات موجود ضخامت روکش مورد نیاز قبل و بعد از اجرا (براساس روش غیرمخرب) و ضخامت روکش اجرا شده برای هر کدام از قطعات آسفالت خالص محاسبه گردید. این ضخامتها در جدول شماره ۲ نشان داده شده‌اند.

که در آن:

$d_0$ : افت و خیز اندازه‌گیری شده در مرکز صفحه بارگذاری برحسب اینچ، که باید برای دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتیگراد اصلاح گردد.

P: فشار صفحه بارگذاری برحسب psi

a: شعاع صفحه بارگذاری برحسب اینچ

D: ضخامت کل روسازی برحسب اینچ

$E_p$ : مدول مؤثر کل لایه‌های روسازی

$M_R$ : مدول برجهندگی بستر که با استفاده از بار اعمال شده و افت و خیز دورترین حسگر قابل محاسبه است.

با در اختیار بودن مدول مؤثر کل ( $E_p$ ) روسازی و با استفاده از رابطه ۲ عدد ضخامت مؤثر کل روسازی  $SN_{eff}$  قابل محاسبه است [Predoehl, 1990].

$$S_{neff} = 0.0045 D^3 \sqrt{E_p} \quad (2)$$

که در آن:

$S_{neff}$  = عدد ضخامت مؤثر کل روسازی

بقیه متغیرها در رابطه قبل تعریف شده‌اند.

ضخامت روکش آسفالتی از رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - SN_{eff})}{a_{ol}} \quad (3)$$

$$d_0 = 1.5 pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (1)$$

که در آن:

$$SN_F = \text{عدد ضخامت کل روسازی جدید}$$

$$D_{01} = \text{ضخامت مورد نیاز روکش برحسب، اینچ}$$

$$SN_{01} = \text{عدد ضخامت مورد نیاز روکش}$$

$$a_{01} = \text{ضریب سازه‌ای لایه روکش آسفالتی}$$

با استفاده از ضخامتهای آسفالت مورد نیاز قبل و بعد اجرا، برای هر قطعه و در اختیار داشتن ضخامت روکش که توسط روش مخرب اندازه‌گیری شده است می‌توان رابطه منطقی زیر را فرض کرد.

$$D = a(H_1 - H_2) + b \quad (4)$$

که در آن:

$$D = \text{ضخامت روکش برحسب سانتیمتر}$$

$$H_1 = \text{ارزش سازه‌ای غیرمخرب قبل از اجرا برحسب سانتیمتر}$$

$$H_2 = \text{ارزش سازه‌ای غیرمخرب بعد از اجرا برحسب سانتیمتر}$$

$$a \text{ و } b = \text{متغیرهای مدل}$$

با استفاده از روابط رگرسیون خطی و مقادیر مندرج در جدول ۲ متغیرهای مدل قابل محاسبه هستند. به این ترتیب مقادیر  $a$  و  $b$  به ترتیب برابر با  $۱/۰۲۴$  و  $-۰/۳$  بدست می‌آیند. مقدار ضریب همبستگی  $R$  در این رابطه برابر با  $۰/۹۸۴$  است که نشان دهنده همبستگی مناسب بین داده‌های ورودی مدل است. روابط رگرسیون در نمودار شکل ۴ نشان داده شده است. با جایگذاری متغیرهای  $a$  و  $b$  در رابطه شماره ۴، این رابطه به شکل رابطه ۵ در خواهد آمد.

$$D = ۱/۰۲۴(H_1 - H_2) - ۰/۳ \quad (5)$$

تغییرات ارزش سازه‌ای روسازی ممکن است با گذشت زمان، بر اثر عوامل مختلفی از قبیل بار ترافیکی و خرابیهای ناشی از عوامل محیطی اتفاق بیفتد. با توجه به فاصله زمانی اندک بین دو مرحله آزمایش غیرمخرب قبل و بعد از اجرا در اینجا تغییرات ارزش سازه‌ای روسازی بر اثر اجرای لایه روکش و میان لایه‌های ژئوتکستایل فرض می‌شود. ارزش سازه‌ای مصالح روکش آسفالتی با توجه به کیفیت مورد تأیید و تراکم مناسب لایه روکش برابر ضخامت موجود در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در قطعاتی که میان لایه‌های مختلف استفاده شده ارزش سازه‌ای میان لایه ژئوتکستایل براساس رابطه ۶ قابل محاسبه خواهد بود (این رابطه در این تحقیق ارائه شده است).

$$D_{Geo} = ۱/۰۰۳(H_1 - H_2) - ۰/۳۰ - D_{01} \quad (6)$$

که در آن:

$$D_{Geo} = \text{ارزش سازه‌ای میان لایه ژئوتکستایل برحسب سانتیمتر}$$

$$D_{01} = \text{ضخامت روکش اجرا شده برحسب سانتیمتر}$$

برای بررسی صحت مدل فوق، داده‌های قطعه اول که تنها با آسفالت خالص از کیلومتر صفر تا ۱۵۰ متر ابتدای پروژه اجرا گردیده بود در این مدل وارد و میزان خطای آن بررسی شده است. میزان ارزش سازه‌ای غیرمخرب قبل و بعد از اجرا در این قطعه به ترتیب برابر با  $۳/۵۴$  و  $-۲/۰۸$  سانتیمتر بوده و ضخامت روکش اجرا شده در این قطعه نیز  $۵/۷$  سانتیمتر است. با جایگذاری این اعداد در رابطه ۵ ارزش سازه‌ای میان لایه ژئوتکستایل برابر با  $۰/۲۴$  سانتیمتر به دست خواهد آمد با توجه به عدم وجود مصالح ژئوتکستایل در این قطعه صحت مدل فوق قابل احراز است.

جدول ۱. ضخامتهای روکش قبل و بعد از اجرا در قطعات آسفالت خالص

ردیف	محدوده قطعه آسفالت خالص	ضخامت مورد نیاز قبل از اجرا ( $H_1$ )	ضخامت مورد نیاز بعد از اجرا ( $H_2$ ) *	$H_1 - H_2$	ضخامت واقعی اجرا شده
۱	۱+۶۰۵ تا ۱+۷۳۰	۲/۳۱	-۴/۰۸	۶/۳۹	۶/۳
۲	۱+۷۳۰ تا ۱+۸۵۵	۵/۴۱	-۰/۹	۶/۳۱	۶/۱
۳	۱+۸۵۵ تا ۱+۹۸۰	۴/۲۳	-۱/۶۵	۵/۸۸	۵/۷
۴	۱+۹۸۰ تا ۲+۱۰۰	۳/۱۹	-۲/۶۴	۵/۸۳	۵/۷

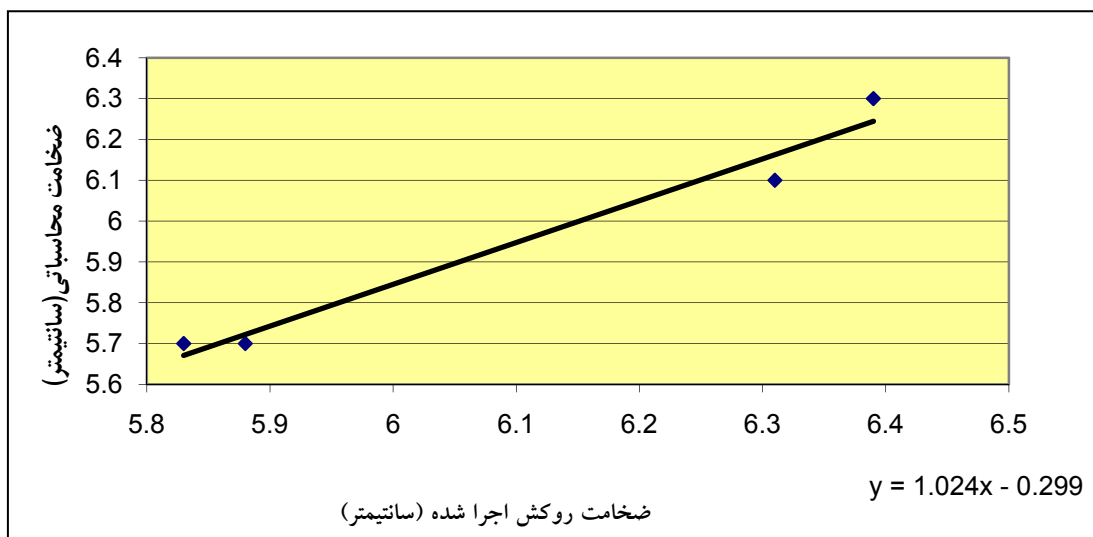
\* ضخامتهای منفی روکش نشان‌دهنده توان سازه‌ای روسازی بیش از میزان مورد نیاز در دوره بهره‌برداری است.

در جدول ۳ اسامی محصولات ژئوتکستایل در ستون دو و میزان ضخامت لایه روکش آسفالتی (از روش غیرمخرب) برای هر هفت قطعه مورد بررسی، قبل و بعد از اجرا به ترتیب در ستونهای سوم و چهارم ذکر شده است. در کلیه این قطعه‌ها روش انجام آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای مطابق با مندرجات استاندارد ASTM D4694 بوده است. کلیه اطلاعات شامل میزان بارها، تعداد ضربه‌ها، چیدمان وزنه‌ها و حتی فواصل حسگرها به اپراتور دستگاه داده شده است. پس از وارد شدن هر ضربه حسگرهای دستگاه، افت و خیزهای حاصل از ضربه را ثبت می‌کنند. خیزسنج‌های مورد استفاده در اینجا ۷ عدد بوده که در شکل شماره ۶ نحوه قرارگیری آنها نشان داده شده است. روند داده‌برداری در قطعات حاوی مصالح ژئوتکستایل مشابه قطعات بکار رفته در ایجاد مدل است.

## ۵. بررسی ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل

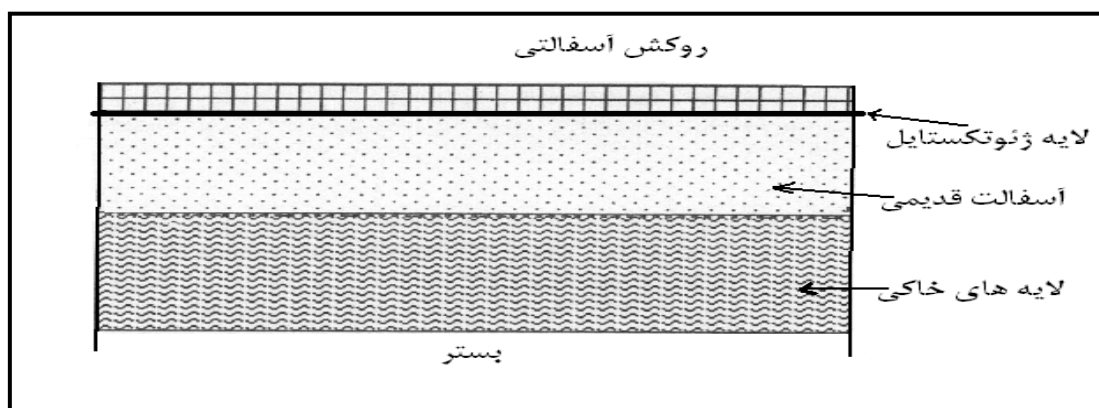
برای بررسی ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل ۳ نوع محصول خارجی و سه نوع محصول ایرانی در قطعه‌های ۲ تا ۸ اجرا گردیده است. برای کاربردی بودن نتایج این تحقیق سعی شده از محصولاتی استفاده شود که تاکنون بیشترین کاربرد را در کشور داشته‌اند. در این تحقیق محصولات ژئوتکستایل بین لایه‌های آسفالتی و در زیر لایه روکش مطابق با شکل ۵ قرار داده شدند.

آزمایشهای استاندارد مربوط به مصالح ژئوتکستایل شامل وزن واحد سطح، نقطه ذوب، مقاومت کششی در دو جهت طولی و عرضی، بر روی محصولات مورد استفاده در این تحقیق انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.



ضخامت روکش اجرا شده (سانتیمتر)

شکل ۴. ضخامت روکش اجرا شده و محاسباتی



شکل ۵. محل قرارگیری لایه ژئوتکستایل در روسازی



شکل ۶. محل قرارگیری حسگرهای دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای

جدول ۲. 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 <sup>2</sup> )	نوع محصول ژئوتکستایل
ASTM D4632	ASTM D4632	ASTM D276	ASTM D5261	
۵۳۹±۷۸	۶۵۶±۶۹	۱۶۰	۱۵۰±۷	محصول خارجی ۱
۸۸۳±۵۹	۹۷۲±۷۸	۱۴۱	۳۰۷±۵	محصول خارجی ۲
۸۸۳±۵۹	۹۷۲±۷۸	۱۴۵	۴۱۵±۴	محصول خارجی ۳
۴۱۴±۳۹	۳۷۵±۳۹	۲۵۰	۱۹۵±۵	محصول ایرانی ۱
۸۷۲±۱۱۸	۶۰۷±۱۳۷	۲۳۲	۲۲۲±۵	محصول ایرانی ۲
۴۱۶±۴۹	۳۱۸±۳۹	۲۲۶	۱۹۵±۱۰	محصول ایرانی ۳

جدول ۳. ضخامت روکش برای کلیه قطعات بعد از اجرا از روش غیرمخرب برحسب سانتیمتر

ضخامت واقعی اجرا شده (CM)	(ارزیابی بعد از اجرا)* میزان ضخامت روکش آسفالتی (CM)	(ارزیابی قبل از اجرا) میزان ضخامت روکش آسفالتی (CM)	نوع محصول ژئوتکستایل	شماره قطعه
۶/۱	۰/۹۲	۱۲/۰	محصول خارجی ۱	۲
۵/۹	۳/۰۳	۱۰/۲۸	محصول خارجی ۲	۳
۴/۱	۲/۸۵	۱۱/۰۲	محصول خارجی ۲	۴
۶/۲	-۳/۱۷	۴/۸۸	محصول خارجی ۳	۵
۶	۰/۱۹	۱۰/۳۹	محصول ایرانی ۱	۶
۶	-۱/۶۳	۶/۳۲	محصول ایرانی ۲	۷
۶/۱	-۴/۶	۲/۶	محصول ایرانی ۳	۸

\* ضخامتهای منفی روکش نشان‌دهنده توان سازه‌ای روسازی بیش از میزان مورد نیاز در دوره بهره‌برداری است.

۱۰/۲۸ و ۳/۰۳ سانتیمتر آسفالت گرم است. با توجه به ضخامت ۵/۹ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با ۱/۲۲ سانتیمتر آسفالت است.

بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب، قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان‌لایه ژئوتکستایل در قطعه چهارم نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با ۱۱/۰۲ و ۲/۸۵ سانتیمتر آسفالت گرم است. با توجه به ضخامت ۴/۱ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با ۳/۹۶ سانتیمتر آسفالت است. معادل سازه‌ای ۳/۹۶ سانتیمتر ضخامت آسفالت گرم مصالح ژئوتکستایل در این قطعه مؤید کارایی مناسب ژئوتکستایل خارجی ۲ است. ولی همین محصول در قطعه سوم با ارزش سازه‌ای برابر با ۱/۲۲ سانتیمتر آسفالت گرم عملکرد متوسطی را از خود نشان داده است. این مورد براساس مشاهدات میدانی ناشی از میزان قیر بیشتری است که در برخی از نقاط قطعه سوم به عنوان تک‌تکت استفاده شده که سبب نرم‌تر شدن جسم روسازی و تغییر مکان بیشتر حسگرهای دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای شده است.

#### قطعه شماره پنج:

شرایط اجرایی و انجام آزمایشهای غیرمخرب افت و خیز ضربه‌ای در این قطعه مطابق با قطعه شماره ۳ است. در این قطعه از ژئوتکستایل خارجی ۳ استفاده شده این محصول به میزان بیشتری نسبت به ژئوتکستایل خارجی ۲ با الیاف شیشه مسلح شده است. بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان‌لایه ژئوتکستایل در این قطعه نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با ۴/۸۸ و ۳/۱۷- سانتیمتر آسفالت گرم است. با توجه به ضخامت ۶/۲ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با ۱/۷۴ سانتیمتر آسفالت گرم است. ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل در این قطعه تقریباً کمتر از ارزیابیهای موجود از مصالح ژئوتکستایل در این زمینه است. انجام آزمایشهای غیرمخرب در قطعات سه و پنج عدم تأثیر الیاف شیشه در ارتقاء ارزش سازه‌ای روسازی را نشان می‌دهد. البته این مورد منافاتی با

## ۶. تحلیل اطلاعات به‌دست آمده به تفکیک

### قطعات

#### قطعه شماره یک:

این قطعه در ابتدای مسیر قرار دارد و به عنوان قطعه شاهد در این مطالعه بررسی شده است. در شش نقطه از این قطعه آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای انجام شده که در هر نقطه داده‌های سه بارگذاری انتخاب و در محاسبات به روش آشتو استفاده شده است. خروجی آزمایشهای غیرمخرب در این قطعه به منظور ارزیابی صحت مدل به دست آمده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

#### قطعه شماره دو:

در این قطعه ژئوتکستایل خارجی ۱ نصب شده است. در شش نقطه این قطعه آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای انجام شده که در هر نقطه داده‌های سه بارگذاری انتخاب و در محاسبات به روش آشتو استفاده شده است.

بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب، قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان‌لایه ژئوتکستایل در این قطعه نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با ۱۲ و ۰/۹۲ سانتیمتر ضخامت آسفالت گرم است. با توجه به ضخامت ۶/۱ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با ۴/۹۵ سانتیمتر آسفالت است. ارزش سازه‌ای ژئوتکستایل خارجی ۱ در قطعه شماره دو مبین کارایی و عملکرد مناسب این محصول در این قسمت از مسیر است.

#### قطعه شماره سه و چهار:

در این قطعه‌ها ژئوتکستایل خارجی ۲ اجرا شده است. تعداد نقاط و میزان بارگذاریهای آزمایش غیرمخرب افت و خیز ضربه‌ای این قطعه‌ها، مانند قطعه شماره یک است. محصول ژئوتکستایل اجرا شده دارای الیاف شیشه بوده که این الیاف در حداقل کرنش، به بیشینه تحمل تنش خود می‌رسند و این امر سبب می‌شود تا در مقابل رشد ترک حداکثر مقاومت را داشته باشد.

بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان‌لایه ژئوتکستایل در قطعه سه نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با



۱/۸۴ سانتیمتر آسفالت گرم است. نتایج حاصل از پژوهشهای انجام شده در این قطعه مبین کیفیت متوسط محصول ژئوتکستایل ایرانی نوع ۲ مورد استفاده است.

#### قطعه شماره هشت:

در این قطعه از محصول ایرانی نوع ۳ استفاده شده است. روند انجام آزمایشهای غیرمخرب در این قطعه مانند قطعه سه است. بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان لایه ژئوتکستایل در این قطعه نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با ۲/۶ و ۴/۶- سانتیمتر آسفالت گرم است.

با توجه به ضخامت ۶/۱ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با ۰/۹۷ سانتیمتر آسفالت گرم است. نتایج حاصل از پژوهشهای انجام شده در این قطعات مبین کیفیت متوسط محصول ژئوتکستایل ایرانی نوع ۳ مورد استفاده است. محصول ژئوتکستایل ایرانی اجرا شده در این قطعه از مقاومت کششی متوسطی در کرنشهای پایین برخوردار بوده که این امر سبب عملکرد نه چندان مناسب آن از نظر سازه‌ای شده است. مقاومت کششی کم این محصول که در آزمایش کشش (grab) در جدول ۳ قابل مشاهده است، یکی از عوامل عملکرد متوسط این محصول در اجرا است.

شکل ۷ ارزش سازه‌ای هرکدام از محصولات ژئوستتیک را در هفت قطعه نشان می‌دهد.

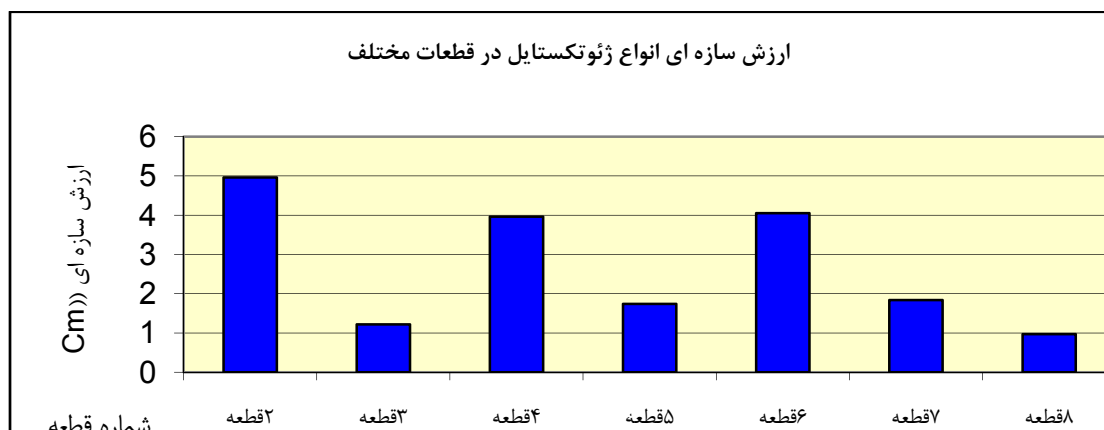
ارزش این الیاف در جلوگیری از بروز ترکهای انعکاسی ندارد و این مسئله باید در مطالعات میدانی مشخص شود.

#### قطعه شماره شش:

شرایط اجرایی و انجام آزمایشهای غیرمخرب افت و خیز ضربه‌ای در این قطعه مطابق با قطعه شماره ۳ بوده و از محصول ژئوتکستایل ایرانی نوع ۱ در این قطعه استفاده شده است. بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب، قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان لایه ژئوتکستایل در این قطعه نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با ۱۰/۳۹ و ۰/۱۹ سانتیمتر آسفالت گرم است. با توجه به ضخامت ۶/۱ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با ۴/۰۴ سانتیمتر آسفالت گرم است. ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل ایرانی در قطعه شماره شش مبین کارایی و عملکرد مناسب این محصول از بعد سازه‌ای در این قسمت از مسیر است.

#### قطعه شماره هفت:

در این قطعه از محصول ایرانی نوع ۲ استفاده شده است. روند انجام آزمایشهای غیرمخرب در این قطعه مانند قطعه قبل است. بررسی نتایج آزمایشهای غیرمخرب قبل و بعد از اجرای لایه روکش و میان لایه ژئوتکستایل در این قطعه نشان می‌دهد که ضخامت روکش مورد نیاز به ترتیب برابر با ۶/۳۲ و ۱-۶/۳۳ سانتیمتر آسفالت گرم است. با توجه به ضخامت ۶/۰ سانتیمتری روکش اجرا شده در این قطعه ارزش سازه‌ای مصالح ژئوتکستایل از رابطه ۵ (براساس مدل ارائه شده) برابر با



شکل ۷. ارزش سازه‌ای محصولات ژئوتکستایل

## ۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی براساس داده‌های روش آزمایش غیرمخرب افت و خیز ضربه‌ای در چهار قطعه آزمایشی ایجاد شده و برای بررسی صحت این مدل از داده‌های مربوط به قطعه شاهد استفاده شده است. رابطه بدست آمده در این تحقیق رابطه ۵ است که با آن می‌توان ارزش سازه‌ای میان‌لایه‌های ژئوتکستایل را در روسازیهای آسفالتی تعیین کرد.

ارزش سازه‌ای به‌دست آمده برای انواع مختلف ژئوتکستایل‌های استفاده شده براساس مدل ارائه شده در این تحقیق به طور میانگین برابر با  $2/68$  سانتیمتر آسفالت گرم است. این مقدار تقریباً در حدود داده‌های به‌دست آمده در مطالعات خارجی در این زمینه است.

دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای وسیله‌ای است که در سطح جهانی برای اندازه‌گیری ظرفیت سازه‌ای روسازی پذیرفته شده است. این دستگاه در پژوهش اخیر نیز نتایج قابل قبولی را نشان داد و تفاوت مشهودی بین نتایج قبل و بعد از اجرا در این پژوهش وجود داشت به طوری که امکان ارزیابی ژئوتکستایل‌های مختلف فراهم شد.

بررسی‌های انجام شده در قطعات دوم، ششم و هفتم نشان دهنده کارایی مناسب محصولات ژئوتکستایل غیرمسلح (بدون الیاف شیشه) در تقویت سازه روسازی است. این مورد بویژه در هنگام ارزیابیهای اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نتایج به دست آمده در قطعات ۲، ۶، ۷ و ۸ ارزش سازه‌ای محصولات ژئوتکستایل غیرمسلح خارجی ۲ و ژئوتکستایل ایرانی ۱، ۲ و ۳ را به ترتیب  $4/95$ ،  $3/96$ ،  $1/84$  و  $0/97$  سانتیمتر آسفالت نشان می‌دهد که میانگین ارزش سازه‌ای این چهار محصول معادل  $2/98$  سانتیمتر آسفالت گرم است. بنابراین استفاده از این محصولات در پروژه‌های راهسازی مضمّن‌تر است.

براساس تحلیلهای انجام شده در بند قبل، در قطعات ۶ و ۷ و ۸ محصولهای ایرانی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب معادل  $4/05$ ،  $1/84$  و  $0/97$  سانتیمتر ضخامت آسفالت گرم ارزش سازه‌ای داشتند. بنابراین میانگین ارزش سازه‌ای محصولات ایرانی ۱ و ۲ با اختلاف کمی با محصولات خارجی برابری می‌کند و می‌توان از این محصولات در زمینه ارتقاء کیفیت روسازی استفاده کرد.

یکی از مهم‌ترین مسائل در نتیجه‌گیری صحیح از آزمایش‌های میدانی مصالح ژئوتکستایل، اجرا صحیح، یکنواخت و به اندازه تک کت در زیر مصالح ژئوتکستایل است. اجرای بیش از اندازه تک کت باعث روزدگی قیر و انعطاف‌پذیری بیش از حد روسازی خواهد شد که نتایج آزمایش افت و خیز ضربه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

میزان بار دینامیکی در انجام آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای باید به مقدار مناسبی انتخاب گردد تا بتوان ارزیابی واقعی از نتایج به دست آمده داشت.

آزمایش‌های غیرمخرب در قطعات سه و پنج عدم تأثیر الیاف شیشه در ارتقاء ارزش سازه‌ای روسازی را نشان می‌دهد. البته این مورد منافاتی با ارزش این الیاف در جلوگیری از بروز ترکهای انعکاسی ندارد و این مسئله باید در مطالعات میدانی مشخص شود.

## ۸. پی‌نوشتها

1. Geotextile
2. Falling Weight Deflectometer
3. Equivalent performance
4. Predoehl
5. Holts
6. Carmichael
7. Marienfeld
8. Sprague
9. Greendille

## ۹. مراجع

- پژوهشکده حمل و نقل [۱۳۸۶] "کاربرد ژئوسنتتیکها در روکشهای آسفالتی جهت کنترل ترکهای انعکاسی"، تهران، پژوهشکده حمل و نقل.

- AASHTO (1993) "Guide for design of pavement structure", USA: AASHTO.

- ASTM (2009) "Annual Book of ASTM Standard" Volume 04.03. ASTM D-4694, USA: ASTM.

- Barnhart, V. T. (1989) "Field evaluation of experimental fabrics to prevent reflective cracking in bituminous resurfacing", Report No. R-1300. Materials and Technology Division, Michigan Transportation Commission, Lansing, Michigan.

- Predoehl, N. H. (1990) "Evaluation of paving fabric test installations in California". Report No. FHWA/CA/TL-90/02. California Department of Transportation, Sacramento, California.
- Sprague, C. J. (2006) "Study of the cost-effectiveness of various flexible pavement maintenance treatments", In Transportation Research Circular, Maintenance Management 2008, Presentations From The 11th AASHTO-TRB Maintenance Management Conference, Number E-C098, TRB, National Research Council, Washington D.C, pp. 45-53.
- Young, S. D., Sung, H. B. and Kwang, W. K. (2009) "Estimation of relative performance of reinforced overlaid asphalt concretes against reflection cracking due to bending more fracture", Construction and Building Materials 23, pp. 1803-1807.
- 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.
- Carmichael, R. F. and Marienfeld, M. L. (1999) "Synthesis and literature review of nonwoven paving fabrics performance in overlays", In Transportation Research Record No. 1687, Geotechnical Aspects of Pavements, TRB National Research Council, Washington, D.C., pp. 112-124.
- Holtz, R. D., Christopher, B. R. and Berg, R. R. (1998) "Geosynthetic design and construction guidelines". Publication No. FHWA HI-95-038, NHI Course No. 13213. National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.