

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

رشته‌ی مهندسی راه و ترابری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی حساسیت رطوبتی اتصال ژئوسنتتیک‌ها با روکش‌های آسفالتی

نگارنده:

امیررضا پایا

استاد راهنما:

دکتر ایمان آقایان

مهر ماه ۱۴۰۰

آنمان کہ مہر آسمانی شان
آرام بخش آلام زمینی ام است.
بہ استوارترین تکیہ گاہم، دستان پر مہر پدرم
بہ سبزترین محاکہ زندگیم، چشمان سبز مادرم
کہ ہرچہ آموختم در مکتب
عشق تھا آموختم و ہرچہ بگو شتم
قطرہ ای از دریای بی کران
مہربانیتان را پاس توانم بگویم.

پاسکزاری

بر اساس حدیث معروف پیامبر اکرم (ص) من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق و طیفه خود می دانم تا مراتب

پاس و تشکر خود را از زحمات بی شائبه و ارشادات ارزشمند استاد بزرگوار جناب آقای دکتر ایمان آقاییان که مراد تهیه

و تدوین این رساله یاری نموده اند ابراز نمایم.

تعهدنامه

اینجانب **امیررضا پایا** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع ارزیابی حساسیت رطوبتی اتصال ژئوسنتتیک ها با روکش های آسفالتی تحت راهنمایی دکتر ایمان آقایان متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

روسازی‌های آسفالتی سیستم‌های چند لایه‌ای هستند که می‌توان آنها را بوسیله ژئوسنتتیک‌ها تسلیح نمود. ژئوسنتتیک‌ها اغلب از طریق اندودهای قیری در بین لایه‌ها آسفالتی نصب می‌شوند تا از توزیع و انتقال تنش بین آنها و مخلوط آسفالتی اطمینان کافی کسب گردد. آسیب‌دیدگی اتصال ژئوسنتتیک با لایه‌های آسفالتی می‌تواند سبب‌ساز افزایش تنش‌ها در لایه‌های فوقانی روسازی شده و نهایتاً خرابی زودرس آن را رقم بزند. نفوذ رطوبت به درون لایه‌های روسازی از مهمترین عوامل مخرب اتصال اندودهای سطحی با ژئوسنتتیک‌ها و مخلوط آسفالتی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات درازمدت رطوبت بر مقاومت اتصال اندودهای سطحی از آزمون برش مستقیم استفاده گردید. در این راستا نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای ساخته شده در آزمایشگاه بوسیله اندود سطحی بر پایه قیر خالص ۶۰-۷۰ دو به دو به یکدیگر متصل شده تا زوج‌نمونه‌های مورد سنجش را تشکیل دهند. سه نوع ژئوسنتتیک شامل: ژئوتکستایل، ژئوگرید پیوندخورده و توری مشبک (به نمایندگی از ژئوگریدهای اکستروده) در ساخت زوج‌نمونه‌ها استفاده گردید. جهت ارزیابی تأثیر اصلاح قیر اندود بوسیله افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی، نوعی افزودنی تجاری بر پایه پلی‌آمین‌های اسید چرب در مقادیر ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد بکارگرفته شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر اتصالات اندودهای سطحی از کاندیشن رطوبتی استاندارد AASHTO T283 و یک کاندیشن رطوبتی پیشنهادی استفاده گردید. نتایج نشان داد که کاندیشن رطوبتی استاندارد AASHTO T283 از توانایی مناسبی جهت شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر روی اندودهای سطحی برخوردار نیست. همچنین تحلیل نتایج آشکار نمود که افزودنی ضد عریان‌شدگی مورد استفاده نتوانسته است تأثیری بر روی مقاومت برشی اتصالات اندودهای سطحی ایجاد نماید. علاوه بر این دیده شد که بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها -به‌خصوص ژئوگریدها- در بین لایه‌های آسفالتی ممکن است سبب کاهش ظرفیت باربری برشی بین آنها گردد. ضعیف‌ترین عملکرد برشی در زوج‌نمونه‌های حاوی ژئوگرید اکستروده شده مشاهده شد، اما به طور کلی زوج‌نمونه‌های با و بدون ژئوسنتتیک حساسیت رطوبتی تقریباً یکسانی از خود نشان دادند.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی، ژئوسنتتیک، اندود سطحی، حساسیت رطوبتی، آزمون برش مستقیم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسأله	۲
۳-۱ ضرورت و اهمیت انجام پژوهش	۳
۴-۱ اهداف پژوهش	۴
۵-۱ فرض‌های پژوهش	۵
۶-۱ فرضیه‌های پژوهش	۶
۷-۱ نوآوری پژوهش	۷
۸-۱ ساختار فصول پایان‌نامه	۷
فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ روسازی آسفالتی	۱۰
۱-۲-۲ مخلوط‌های آسفالتی داغ	۱۱
۳-۲ مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای	۱۲
۴-۲ عوامل تأثیرگذار بر مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای	۱۵
۱-۴-۲ اندود سطحی	۱۵
۱-۴-۲-۱ مقدار اندود سطحی	۱۵
۲-۴-۲-۱ نوع اندود سطحی	۱۶
۲-۴-۲ بافت و زبری سطح و شرایط سطحی	۱۷
۳-۴-۲ درجه حرارت	۱۸
۵-۲ جدایش لایه‌ها و عوامل مؤثر بر آن	۱۸
۶-۲ آزمایش‌های تعیین مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای	۲۳
۷-۲ دستگاه‌های انجام آزمایش برش	۲۵

۲۸	۸-۲ خرابی‌های رطوبتی
۲۹	۹-۲ مکانیزم‌های خرابی رطوبتی
۳۱	۱۰-۲ عوامل کاهش‌دهنده خرابی رطوبتی
۳۱	۱-۱۰-۲ مواد ضد عریان‌شدگی مایع
۳۲	۲-۱۰-۲ استایرن بوتادین استایرن
۳۲	۳-۱۰-۲ آهک هیدراته
۳۲	۱۱-۲ مروری بر ادبیات عوامل کاهش‌دهنده خرابی رطوبتی
۳۵	۱۲-۲ آزمایش‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی
۳۶	۱-۱۲-۲ آزمایش لاتمن اصلاح شده
۳۷	۲-۱۲-۲ کاندیشن (پیش شرایط)‌های رطوبتی
۳۸	۱۳-۲ ژئوسنتتیک‌ها
۴۰	۱-۱۳-۲ ژئوتکستایل‌ها
۴۱	۲-۱۳-۲ ژئوگریدها
۴۱	۳-۱۳-۲ ژئوکامپوزیت‌ها
۴۳	۱۴-۲ مکانیزم‌های تسلیح ژئوسنتتیک‌ها
۴۴	۱۵-۲ مروری بر ادبیات مقاومت چسبندگی میان لایه‌های ژئوسنتتیکی
۵۱	۱۶-۲ جمع‌بندی
۵۳	فصل سوم: فعالیت‌های آزمایشگاهی
۵۴	۱-۳ مقدمه
۵۴	۲-۳ مشخصات مواد و مصالح مصرفی
۵۴	۱-۲-۳ خصوصیات مصالح سنگی
۵۴	۲-۲-۳ دانه‌بندی مصالح سنگی
۵۷	۳-۲-۳ خصوصیات قیر
۵۷	۴-۲-۳ مشخصات ژئوسنتتیک‌ها
۵۸	۱-۴-۲-۳ ژئوتکستایل آسفالتی PE ۳۰۰

۵۸	 ۲-۴-۲-۳ ژئوگرید آسفالتی ۵۰/۵۰
۶۱	 ۳-۴-۲-۳ توری مشبک
۶۲	 ۵-۲-۳ افزودنی ضد عریان‌شدگی
۶۲	 ۳-۳ مراحل و شیوه ساخت نمونه‌های مورد آزمایش
۶۳	 ۱-۳-۳ تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی
۶۷	 ۲-۳-۳ ساخت زوج نمونه‌های آسفالتی
۶۹	 ۳-۳-۳ اندود سطحی
۷۰	 ۴-۳ اعمال کاندیشن‌های رطوبتی
۷۳	 ۵-۳ آزمایش برش مستقیم
۷۶	 ۶-۳ آزمایش پخش ماسه
۷۹	 فصل چهارم: تحلیل و تفسیر نتایج
۸۰	 ۱-۴ مقدمه
۸۰	 ۲-۴ آزمون پخش ماسه
۸۲	 ۳-۴ ارزیابی امکان بکارگیری شرایط رطوبتی AASHTO T283
۸۵	 ۴-۴ آزمون برش مستقیم
۸۵	 ۱-۴-۴ تأثیر ژئوسنتتیک‌ها بر دوام اتصال لایه‌های آسفالتی در برابر شرایط رطوبتی
۸۹	 ۲-۴-۴ تأثیر افزودنی ضدعریان‌شدگی بر دوام اتصال لایه‌های آسفالتی در برابر شرایط رطوبتی
۹۳	 ۳-۴-۴ جمع‌بندی
۹۷	 فصل پنجم: جمع بندی نتایج و پیشنهادات
۹۸	 ۱-۵ نتیجه‌گیری
۹۹	 ۲-۵ پیشنهادات
۱۰۱	 منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: اجزای اصلی مخلوط آسفالتی	۱۰
شکل ۲-۲: لایه‌های مختلف در روسازی آسفالتی	۱۲
شکل ۳-۲: عملکرد روسازی در حالت‌های مختلف چسبندگی بین لایه‌های آن	۱۳
شکل ۴-۲: توزیع کرنش‌ها و تنش‌های برشی براساس سطح چسبندگی بین لایه‌ها	۱۴
شکل ۵-۲: حالات مختلف گسیختگی ناشی از ضعف اندود سطحی	۱۹
شکل ۶-۲: پدیده مکش تایر در گسیختگی کششی	۲۰
شکل ۷-۲: مکانیزم گسیختگی توأم برشی و کششی	۲۱
شکل ۸-۲: انواع حالات شکست اتصال لایه‌ها	۲۱
شکل ۹-۲: طریقه اعمال بار و گسیختگی در انواع آزمایش‌های مقاومت چسبندگی	۲۴
شکل ۱۰-۲: دستگاه‌های آزمایش برش	۲۶
شکل ۱۱-۲: فیکسچر برش مستقیم مورد استفاده در پژوهش	۲۷
شکل ۱۲-۲: شکست چسبندگی و پیوستگی به دلیل حضور آب	۳۰
شکل ۱۳-۲: انواع ژئوتکستایل	۴۱
شکل ۱۴-۲: انواع ژئوگرید	۴۲
شکل ۱۵-۲: ژئوکامپوزیت ژئوتکستایل-ژئوگرید	۴۲
شکل ۱-۳: محدوده دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده	۵۷
شکل ۲-۳: ژئوتکستایل نبافته مورد استفاده	۶۰
شکل ۳-۳: ژئوگرید آسفالتی مورد استفاده	۶۱
شکل ۴-۳: توری مشبک مورد استفاده	۶۲
شکل ۵-۳: چکش تراکم مارشال	۶۵

- شکل ۳-۶: نحوه قرارگیری نمونه در جک مارشال ۶۶
- شکل ۳-۷: نمودار تعداد ضربات در برابر فضای خالی ۶۷
- شکل ۳-۸: تصاویری از ساخت نمونه‌های آسفالتی دارای ژئوسنتتیک ۶۸
- شکل ۳-۹: زوج نمونه‌های نهایی ساخته شده ۶۹
- شکل ۳-۱۰: نحوه اعمال اندودهای سطحی ۷۰
- شکل ۳-۱۱: اشباع‌سازی نمونه‌ها بوسیله پمپ خلاء و دسیکاتور ۷۱
- شکل ۳-۱۲: اعمال کاندشین ذوب و یخ ۷۲
- شکل ۳-۱۳: حوضچه اعمال کاندیشن غرقابی ۷۳
- شکل ۳-۱۴: فیکسچر ساخته شده جهت آزمون برش مستقیم ۷۴
- شکل ۳-۱۵: نحوه اعمال نیرو بر روی مرز مشترک زوج نمونه‌های آسفالتی ۷۴
- شکل ۳-۱۶: زوج نمونه آسفالتی پس از برش خوردگی ۷۵
- شکل ۳-۱۷: نحوه انجام آزمایش پخش ماسه ۷۷
- شکل ۴-۱: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی اصلاح نشده ۸۶
- شکل ۴-۲: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی حاوی ۰/۲ درصد افزودنی... ۸۶
- شکل ۴-۳: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی حاوی ۰/۳ درصد افزودنی.. ۸۷
- شکل ۴-۴: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی حاوی ۰/۴ درصد افزودنی.. ۸۷

- شکل ۴-۵: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک ۹۰
- شکل ۴-۶: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های دارای ژئوتکستایل ۹۰
- شکل ۴-۷: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های دارای ژئوگرید ۹۱
- شکل ۴-۸: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های دارای توری مشبک ۹۱
- شکل ۴-۹: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها و اصلاح اندود سطحی پیش از اعمال شرایط رطوبتی ۹۴
- شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها و اصلاح اندود سطحی پس از اعمال شرایط رطوبتی ۹۴

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: طبقه‌بندی حالات شکست میان لایه مربوط به شکل (۸-۲)	۲۲
جدول ۲-۲: مروری بر کارهای گذشته	۴۹
جدول ۱-۳: مشخصات مربوط به کیفیت مصالح سنگی	۵۵
جدول ۲-۳: مقادیر وزن مخصوص و میزان درصد جذب آب مصالح سنگی	۵۶
جدول ۳-۳: دانه‌بندی مصالح سنگی	۵۶
جدول ۴-۳: نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر پاساگاد تهران	۵۸
جدول ۵-۳: مشخصات ژئوتکستایل	۵۹
جدول ۶-۳: مشخصات ژئوگرید	۶۰
جدول ۷-۳: مشخصات فیزیکی تگودادیبیت ال ۳۰۰	۶۳
جدول ۸-۳: مقدار اندود سطحی مصرفی در سطح مشترک دو لایه	۶۹
جدول ۹-۳: متغیرها و تعداد نمونه‌های ساخته شده	۷۵
جدول ۱-۴: نتایج نمونه‌های یخبندان (بدون مرحله ذوب)	۸۰
جدول ۲-۴: نتایج نمونه‌های ذوب و یخ (AASHTO T283)	۸۱
جدول ۳-۴: نتایج نمونه‌های غرقابی (روش پیشنهادی)	۸۱
جدول ۴-۴: متغیرها و مشخصات نمونه‌های ذوب و یخ (AASHTO T283)	۸۳

فصل اول: کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

حمل و نقل یکی از اساسی ترین نیازهای جوامع بشری از بدو خلقت بوده و راه‌ها نخستین ابزارهای ارتباطی بین انسان‌ها بوده‌اند. امروزه راه‌ها به عنوان شریان‌های مهم جابجایی ایمن و سریع مسافر و کالا، در توسعه سیاسی، اقتصادی و اجتماعی کشورها نقش مهمی ایفا نموده و از مهمترین زیرساخت‌ها محسوب می‌گردند. گسترش شبکه راه‌ها یکی از پارامترهای مهم رشد اقتصادی کشورها محسوب می‌شوند، اما باید توجه داشت که حفظ و نگهداری این سرمایه‌های ملی، لازمه اصلی بهره‌گیری از پتانسیل آنها است. ایران به عنوان کشوری در حال توسعه، با افزایش روز افزون حجم ترافیک و میزان بار عبوری از شبکه راه‌ها رو به رو بوده و متأسفانه هر سال حجم انبوهی از ثروت ملی خود را بر اثر خرابی‌های زودرس رویه‌های آسفالتی از دست می‌دهد. از این رو لازم است تا با صرف دقت کافی در هر یک از مراحل طراحی، ساخت، اجرا و همچنین ترمیم و نگهداری، از هرگونه ضعف و کاستی که باعث بروز خسارات جبران‌ناپذیر اقتصادی می‌گردد جلوگیری به عمل آید.

۱-۲ بیان مسأله

روسازی راه‌ها سیستم‌های چندلایه‌ای بوده که کیفیت چسبندگی بین آنها از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر دوام سازه‌ای آنها محسوب می‌گردد. این چسبندگی مسئول رفتار تمامی لایه‌ها به عنوان یک سیستم یکپارچه و واحد بوده و همچنین وظیفه کاهش ترک‌ها و تغییر شکل‌های روسازی را برعهده دارد. مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها با قفل‌شدگی (چفت‌وبست)^۱ مکانیکی سنگدانه‌ها و همچنین گیرش و چسبندگی لایه‌ها با قیر در ارتباط است (راپوسیراس و همکاران)^۲، ۲۰۱۳ و گرزيسک و مالیکی^۳،

¹ Interlocking

² Raposeiras et al.

³ Gorszczyk and malicki

۲۰۲۰). یکی از پرکاربردترین انواع میان لایه‌ها در روسازی‌های آسفالتی ژئوسنتتیک‌ها (پارچه‌گون‌ها)^۱ می‌باشند که با اهداف گوناگونی شامل: کاهش تغییرشکل‌های دائمی (شیارشده‌گی)، کاهش نفوذ رطوبت، کاهش گسترش ترک‌ها و... در بین یا درون لایه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد این میان لایه‌ها نه تنها همچون سایر میان لایه‌ها تحت تأثیر انتقال تنش برشی بین لایه‌ای بوده، بلکه خود نیز می‌توانند با توجه به خصوصیات مکانیکی و فیزیکی، اندرکنش بین دو لایه آسفالتی را متأثر سازند.

رطوبت از عوامل جدایی‌ناپذیر شرایط خدمت‌دهی روسازی‌ها تلقی شده و نقش آن در عملکرد و بروز خرابی‌های مخلوط‌های آسفالتی قابل چشم‌پوشی نیست. نفوذ رطوبت و آب ناخواسته به درون ساختار لایه‌ای روسازی - عمدتاً از طریق ترک‌های موجود در سطح روسازی - می‌تواند به عنوان عاملی مخرب، اتصال و مقاومت چسبندگی (برشی) بین لایه‌های روسازی را تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش انتقال بار بین آنها شود. استفاده از قیر جهت چسبندگی بین دو لایه آسفالتی، که اغلب از آن با عنوان اندود سطحی (تک کت^۲) یاد می‌شود، یکی از متداول‌ترین روش‌های بهبود اتصال دو لایه آسفالتی با یکدیگر می‌باشد. خصوصیات و ویژگی‌های قیر مورد استفاده برای این امر تأثیر بسازی بر کیفیت و کمیت انتقال بار بین دو لایه دارد. در صورتی که بتوان چسبندگی و دوام قیر مورد استفاده در اندود سطحی را در برابر آسیب‌های رطوبتی افزایش داد، گام مؤثری در جهت هر چه یکپارچه عمل نمودن لایه‌های آسفالتی برداشته خواهد شد. پژوهش حاضر تلاش دارد تأثیر رطوبت بر مقاومت اتصال قیر اندود سطحی بکار گرفته شده جهت اتصال ژئوسنتتیک‌ها با لایه‌های آسفالتی را مورد بررسی قرار دهد.

۳-۱ ضرورت و اهمیت انجام پژوهش

در چند دهه گذشته ژئوسنتتیک‌ها به عنوان ابزاری جهت بهبود عملکرد سازه‌ای و دوام روسازی‌ها مورد کاربرد بوده‌اند. عمده‌ترین نقش آنها در کاستن از تغییرشکل‌های دائمی (شیارشده‌گی) و محدود

¹ Geosynthetics

² Tack coat

ساختن نفوذ رطوبت به لایه‌های زیرین روسازی بوده است. پیوند میان ژئوسنتتیک‌ها با مخلوط آسفالتی در روکش روسازی‌های انعطاف‌پذیر، اصلی‌ترین عامل انتقال تنش‌های ناشی از بارگذاری از لایه آسفالتی به ژئوسنتتیک نصب شده درون آنهاست. گسست میان ژئوسنتتیک و لایه آسفالتی نه تنها پل انتقال بار بین این دو را قطع می‌نماید، بلکه سبب جدایش بین لایه‌های روکش^۱ آسفالتی شده و در نتیجه با کاهش سطح مقطع باربر در آنها، سبب بروز تنش‌های بیش از ظرفیت گردیده و نهایتاً خرابی زودرس روسازی را رقم می‌زند.

رطوبت به عنوان یکی از عوامل مختل‌کننده و آسیب‌زای پیوندهای قیری همواره مورد توجه محققین و پژوهشگران حوزه راه و ترابری بوده است. با این وجود تأثیر آن بر اتصالات قیری بین لایه‌های روسازی یا میان لایه‌ها آسفالتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نظر به حضور اجتناب‌ناپذیر رطوبت در شرایط خدمت‌دهی روسازی و احتمال آسیب آن به پیوندهای مذکور، مناسب است تا تأثیرپذیری آنها از رطوبت بررسی و متغیرهای مؤثر بر آنها شناسایی و ارزیابی گردند.

۱-۴ اهداف پژوهش

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تأثیر رطوبت بر مقاومت برشی^۲ سطح مشترک^۳ لایه‌های مسلح‌شده با ژئوسنتتیک‌ها در روسازی آسفالتی بوده است.

از دیگر اهداف این مطالعه می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- ارزیابی تأثیر بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها بر مقاومت برشی اتصال بین لایه‌های آسفالتی
- ارزیابی تأثیر اصلاح اندود سطحی بوسیله افزودنی ضد عریان‌شدگی بر پایه پلی‌آمین‌های اسید چرب بر میزان حساسیت رطوبتی اتصال لایه‌های آسفالتی با یکدیگر و با ژئوسنتتیک‌ها

¹ Overlay

² Shear strenght

³ Interface

- ارزیابی امکان‌پذیری بکارگیری شرایط رطوبتی پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 –موسوم به لاتمن اصلاح‌شده- به منظور بررسی اثرات تخریبی رطوبت بر روی اتصال لایه‌های آسفالتی با یکدیگر و با ژئوسنتتیک‌ها
- بررسی اثر ژئوسنتتیک‌ها بر تأثیرات رطوبت روی مقاومت برشی اتصال بین لایه‌های آسفالتی
- ارزیابی شرایط رطوبتی پیشنهادی در مطالعه حاضر به عنوان جایگزینی برای روش استاندارد AASHTO T283 جهت شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر مقاومت اتصال لایه‌های آسفالتی

۵-۱ فرض‌های پژوهش

نظر به محدودیت‌های حاکم بر فعالیت‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر، جهت نیل به اهداف این پژوهش فرض‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- با وجود تلاش بر یکنواختی در اجزای تشکیل‌دهنده و شیوه ساخت مخلوط‌های آسفالتی و زوج‌نمونه‌های مورد سنجش –فارغ از متغیر مورد بررسی در هر مورد- همواره احتمال تفاوت‌های اندک میان آنها وجود داشته است. فرض بر این است که نمونه‌های ساخته شده جهت آزمون، دارای مصالح و اجزای تشکیل‌دهنده یکنواخت هستند.
- علی‌رغم دقت در پخش یکنواخت و یکسان اندود سطحی در زوج‌نمونه‌های مخلوط آسفالتی، تمایز نحوه توزیع قیر در آنها اجتناب‌ناپذیر بوده است. به جز مواردی که در آنها اندود سطحی و عوامل مرتبط با آن متغیر آزمون بوده‌اند، فرض بر این است که زوج‌نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش، دارای اندودهای سطحی مشابه و با توزیع یکسان هستند.

- به دلیل عدم دسترسی به ژئوگرایدهای اکستروود شده و با توجه به شباهت فیزیکی و شیوه تولید تقریباً یکسان توری‌های مشبک با آنها، فرض شده است که عملکرد توری‌های مشبک در آزمون‌های انجام پذیرفته، مشابه با ژئوگرایدهای اکستروود شده می‌باشد.
- باتوجه به ویژگی‌های دستگاه یونیورسال (UTM¹) و شرایط فیکسچر برش مستقیم مورد استفاده و نیز وضعیت فیزیکی نمونه‌های ساخته شده، احتمال عدم توازی حقیقی صفحات استوانه‌های آسفالتی وجود داشته است. فرض بر این است که نیروی وارده از جانب دستگاه به نمونه‌های آسفالتی، فقط سبب برش خالص گردیده و هیچ تصویر نیروی دیگری در سایر راستاها ایجاد ننموده است.
- نظر به عدم استفاده از اتاقک کنترل دما (چمبر²) در طول فرآیند بارگذاری در آزمایشات، فرض شده است که آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شده و تغییرات دمایی تأثیری بر نتایج اندازه‌گیری شده نداشته است.

۱-۶ فرضیه‌های پژوهش

- با توجه به اهداف و متغیرهای بیان گردیده برای آزمایشات، فرضیه‌های زیر در این پژوهش مورد بررسی واقع شده‌اند:
- حضور رطوبت سبب تخریب اتصال میان اندود سطحی با لایه‌های آسفالتی و یا ژئوسنتتیک‌ها می‌گردد.
 - آسیب‌زایی رطوبت بر اتصال اندود سطحی، بدون پدیده یخبندان و سیکل‌های ذوب و یخ نیز محسوس و قابل توجه است.

¹ Universal test machine

² Chamber

- ژئوسنتتیک‌های دارای سطح تماس بیشتر با لایه آسفالتی، اتصال قیری بهتری با آنها برقرار کرده و نتیجتاً اتصال آنها دوام بیشتری را در برابر شرایط رطوبتی تجربه خواهد نمود.
- استفاده از افزودنی ضد جریان‌شدگی در اندود سطحی سبب کاهش حساسیت رطوبتی اتصال قیری بین لایه‌های آسفالتی و نیز اتصال بین ژئوسنتتیک‌ها با مخلوط آسفالتی می‌گردد.

۷-۱ نوآوری پژوهش

علی‌رغم مطالعات نسبتاً گسترده در رابطه با تأثیرات رطوبت بر ساختار و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، تاکنون پژوهش‌های بسیار محدودی بر روی چگونگی تأثیرپذیری اتصالات لایه‌ها و میان‌لایه‌های آسفالتی از حضور آب و رطوبت انجام پذیرفته است. ژئوسنتتیک‌ها نیز از این موضوع مستثنی نبوده و مطالعه‌ای که مشخصاً اثرات رطوبت را بر اتصال آنها با لایه‌های آسفالتی بررسی نموده باشد در دسترس نیست. بررسی تأثیر شرایط رطوبتی بر اتصال قیری (اندود سطحی) بین لایه‌های آسفالتی و همچنین اثر آن بر اتصال بین ژئوسنتتیک‌ها با مخلوط آسفالتی، از نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر هستند.

۸-۱ ساختار فصول پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل گردآوری شده است که مطالب و محتویات هر فصل در ادامه توضیح داده می‌شود. در فصل اول مقدمه و کلیات پژوهش و همچنین ضرورت انجام آن، اهداف و نوآوری تحقیق ارائه شده است. در فصل دوم، پس از بیان مختصری از تعاریف مورد نیاز، برخی از مطالعات و تحقیقات پیشین مرتبط با موضوع تحت بررسی از جمله: حساسیت رطوبتی، ژئوسنتتیک‌ها و مقاومت چسبندگی لایه‌های آسفالتی، بیان شده است. در فصل سوم به شرح آزمایش‌ها پرداخته شده و مشخصات مواد، مصالح و برنامه آزمایش‌های انجام شده به همراه جزئیات لازم برای رسیدن به اهداف تحقیق ذکر شده است. در فصل چهارم خروجی‌ها و داده‌های بدست آمده از فعالیت‌های آزمایشگاهی بررسی و تحلیل

گردیده و نتایج آنها به صورت جداول و نمودار نشان داده شده است. در پایان، فصل پنجم به مهمترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر پرداخته و در جهت رفع محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده نیز ارائه داده است.

فصل دوم:

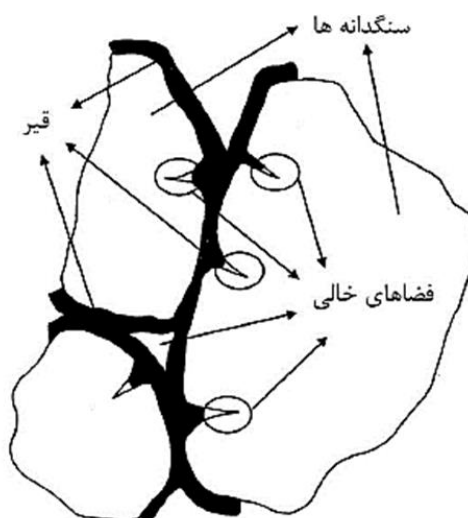
مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲ مقدمه

در این فصل تحقیقات و مطالعات مختلف در زمینه حساسیت رطوبتی و همچنین ارزیابی مقاومت برشی و چسبندگی سطح مشترک لایه‌های مسلح‌شده با ژئوسنتتیک‌ها در روسازی آسفالتی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. قبل از بررسی پژوهش‌های انجام شده، لازم است مقدمه‌ای در مورد روسازی‌های انعطاف‌پذیر و مخلوط‌های آسفالتی بیان گردیده و تعاریف لازم ارائه گردند.

۲-۲ روسازی آسفالتی

روسازی‌ها از نظر نوع مصالح مصرفی در قشر رویه - که شامل بتن، آسفالت و یا مختلط (بتن و آسفالت) می‌باشد - به سه دسته روسازی صلب (بتنی)، انعطاف‌پذیر (آسفالتی) و مختلط تقسیم می‌شوند. روسازی‌های آسفالتی سیستم‌هایی با ساختار لایه‌ای می‌باشند که به طور معمول با ترکیب متنوعی از بارگذاری‌های ترافیکی نامنظم و شرایط محیطی مختلف روبه‌رو می‌شوند. عملکرد روسازی آسفالتی وابسته به مخلوط آسفالتی مورد استفاده در آنها می‌باشد. مخلوط آسفالتی ماده‌ای مرکب است که از ترکیب مصالح سنگی، قیر، هوا و فیلر تشکیل شده است. اجزای اصلی مخلوط آسفالتی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: اجزای اصلی مخلوط آسفالتی (گاربر و هول، ۲۰۰۹)

معمولاً روسازی آسفالتی، از سه لایه متمایز زیراساس، اساس و آسفالت تشکیل می‌شود. زیراساس اغلب اولین قشری است که روی بستر آماده شده روسازی راه قرار می‌گیرد. مصالح این قشر معمولاً دانه‌ای و با کیفیت بالا بوده که در تمام عرض بستر روسازی پخش و کوبیده می‌شود. قشر اساس، دومین قشر از روسازی راه است که متشکل از بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها^۱، درصد قیر نسبتاً کم و حداقل ضخامت ۱۵۰ میلیمتر بوده که بر روی لایه زیراساس قرار می‌گیرد. این لایه نقش مهمی در توزیع بار اعمالی داشته و در برابر تنش‌های کششی بالا، به عنوان لایه خمشی عمل می‌کند.

لایه آسفالتی خود از دو لایه رویه (توپکا) و آستر (بیندر) تشکیل شده است. لایه آستر بین دو قشر رویه و اساس قرار گرفته و به وسیله اندود نفوذی (پریمکت^۲) به قشر زیرین خود متصل می‌گردد. دانه‌بندی آن درشت‌تر از آسفالت رویه و مقدار قیر آن کمتر است. آسفالت رویه آخرین قشر روسازی آسفالتی است که در تماس مستقیم با بارهای وارده از ترافیک و عوامل جوی محیط قرار می‌گیرد. این لایه به وسیله اندود سطحی بر روی لایه زیرین خود (آستر) قرار گرفته و طوری طراحی و اجرا می‌گردد که تحمل بارهای وارده را داشته و در مقابل تغییرات آب‌وهوایی دوام آورد (خویر و فوردیس^۳، ۲۰۰۳ و نشریه شماره ۲۳۴، ۱۳۹۰). شکل (۲-۲) لایه‌های مختلف روسازی آسفالتی را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱ مخلوط‌های آسفالتی داغ

معمولاً مخلوط‌های آسفالتی بر اساس درجه‌ی حرارت تولیدشان، به چهار گروه داغ، گرم، نیمه گرم و سرد تقسیم می‌شوند. مخلوط آسفالتی داغ^۴، ترکیبی است از سنگدانه‌های شکسته و دانه‌بندی شده و فیلر که در کارخانه آسفالت حرارت داده شده و با قیر گرم مخلوط و نهایتاً برای استفاده در راه حمل، پخش و کوبیده می‌شود. دمای تولید این گروه از مخلوط‌ها در حدود ۱۶۰ درجه و دمای پخش در حدود

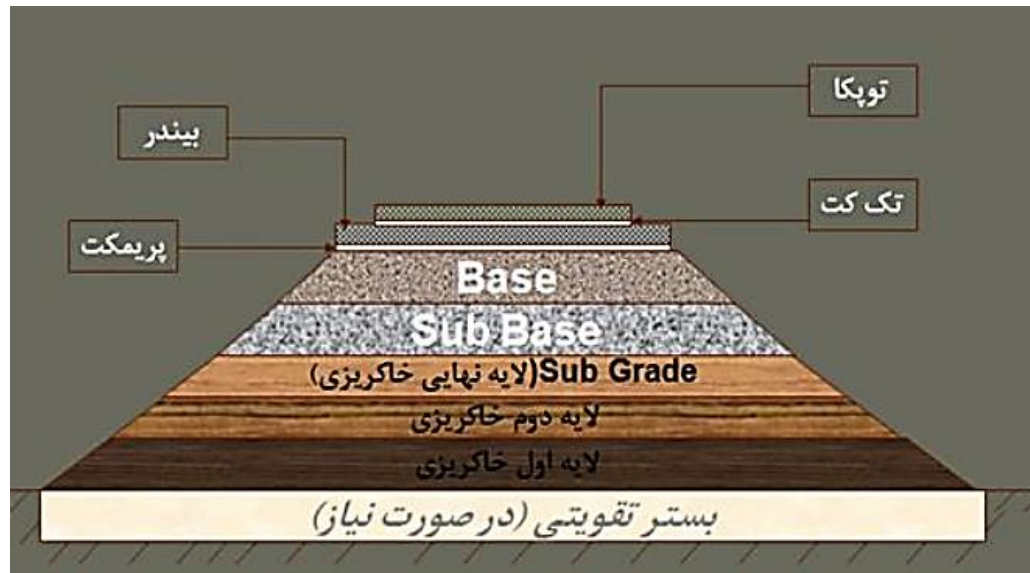
^۱ Large nominal aggregate size

^۲ Prime coat

^۳ Khweir and fordyce

^۴ Hot mix asphalt concrete

۱۳۰ درجه سانتیگراد می باشد. کنترل درجه حرارت و رطوبت مصالح، دوام زیاد، تولید یکنواخت و آماده شدن سریع برای عبور ترافیک، از مزایای آسفالت داغ می باشد. مهمترین کاربرد مخلوط آسفالتی داغ در روسازی همان لایه های رویه روسازی می باشد (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۲).



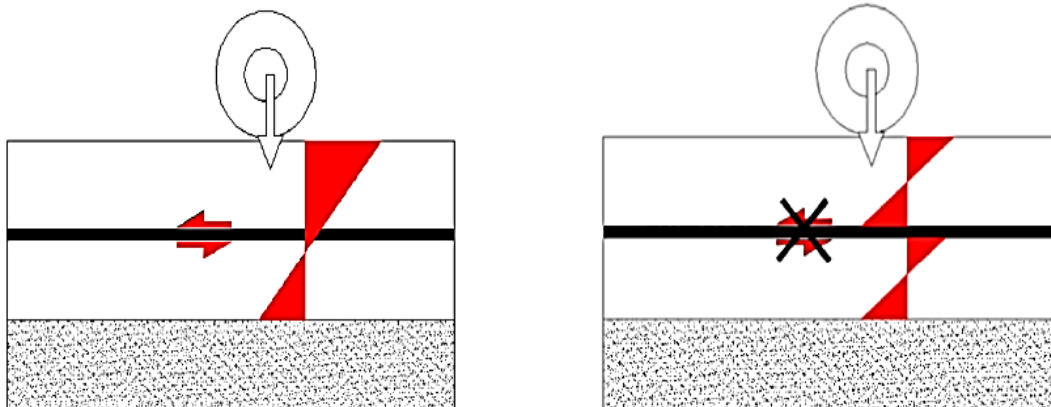
شکل ۲-۲: لایه های مختلف در روسازی آسفالتی (پیرعلایی، ۱۳۹۵)

۲-۳ مقاومت چسبندگی بین لایه های^۱

چسبندگی کافی و مناسب بین لایه های آسفالتی ظرفیت باربری، مقاومت و دوام مورد نیاز روسازی آسفالتی را تضمین می کند. در حالت چسبندگی کافی، لایه های آسفالتی همانند یک سازه یکپارچه عمل کرده و بیشترین تنش ناشی از بار قائم اعمالی در زیر این سازه یکپارچه متمرکز می شود. در مقابل در حالتی که چسبندگی بین لایه های آسفالتی نامناسب باشد، هر لایه عملکرد جداگانه ای داشته و بیشترین تنش در زیر هر لایه اتفاق می افتد. چنین ساختار روسازی، ظرفیت باربری کمتری نسبت به روسازی یکپارچه دارا می باشد (ویتکوس^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). شکل (۲-۳) عملکرد روسازی را در حالت های مختلف چسبندگی بین لایه ها نمایش می دهد.

¹ Bonding

² Vaitkus et al.



الف) عدم چسبندگی بین لایه‌ها

ب) چسبندگی کامل بین لایه‌ها

شکل ۲-۳: عملکرد روسازی در حالت‌های مختلف چسبندگی بین لایه‌های آن (دلبونو^۱، ۲۰۱۵)

یکی از نخستین تحقیقات در مورد چسبندگی میان لایه‌ها توسط اوزان و همکارانش در سال ۱۹۷۸ صورت گرفت. نتایج مطالعه آنها نشان داد که تنش و کرنش روسازی به شدت تحت تأثیر و وابسته به میزان اتصال میان لایه‌ها بوده، که می‌تواند از حالت اتصال پیوسته کامل تا اتصال لغزشی تغییر نماید (ران و همکاران^۱، ۲۰۱۹ به نقل از اوزان و همکاران^۲، ۱۹۷۸). اتصال بین لایه‌های آسفالتی وابسته و مشروط به اصطکاک، چسبندگی و اندرکنش (قفل‌شدگی) لایه‌ها بوده که به این ترتیب نحوه اتصال لایه‌های آسفالتی، می‌تواند یکی از حالت‌های زیر باشد که در شکل (۲-۴) نیز به تصویر کشیده شده است (ویتکوس و همکاران، ۲۰۱۱ به نقل از ولنر و آشر، ۲۰۰۷):

- کاملاً بهم چسبیده^۳: در این حالت لایه‌ها به عنوان یک لایه یکپارچه عمل می‌کنند که در این صورت شاهد بیشترین تنش برشی و کمترین کرنش (جابجایی) خواهیم بود.
- نیمه (تا حدی) چسبیده^۴: در این حالت وابسته به مقاومت چسبندگی لایه‌ها، مقدار تنش‌های برشی و کرنش توسعه یافته در میان لایه تغییر می‌کند. اگر قفل‌شدگی و درگیری

¹ Ran et al.

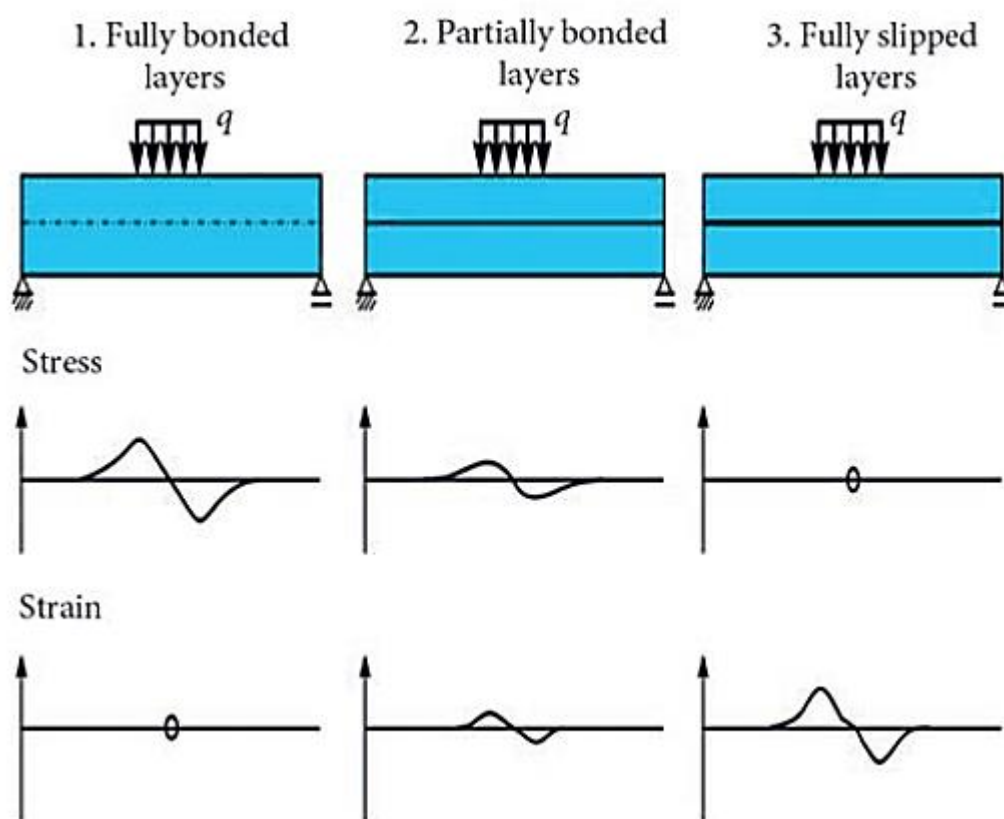
² Uzan et al.

³ Fully bonded layers

⁴ Partially bonded layers

بین لایه‌ها زیاد باشد، شاهد تنش‌های برشی بزرگ و تغییرشکل کوچک خواهیم بود و در صورت اتصال ضعیف لایه‌ها، تنش برشی کم و تغییر شکل زیاد اتفاق خواهد افتاد.

- کاملاً لغزیده نسبت بهم^۱: در این حالت بین لایه‌ها، تنها اصطکاک و چسبندگی ناشی از بار و وزن لایه‌ها وجود دارد و تنش‌های برشی بسیار کوچک و تغییرشکل‌های بسیار بزرگ اتفاق می‌افتد.



شکل ۲-۴: توزیع کرنش‌ها و تنش‌های برشی براساس سطح چسبندگی بین لایه‌ها (ویتکوس و همکاران، ۲۰۱۱ به نقل از ولنر و آشر، ۲۰۰۷)

^۱ Fully slipped layers

۲-۴ عوامل تأثیرگذار بر مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای

خصوصیات اندود سطحی، دما، نوع مخلوط آسفالتی، نوع ژئوسنتتیک، نیروی تراکم، شرایط سطح مشترک دو لایه و بارگذاری، مهم‌ترین عوامل و فاکتورهای مؤثر بر مقاومت چسبندگی بین دو لایه روسازی می‌باشند (وست و همکاران^۱، ۲۰۰۵ و راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳ و لی و همکاران^۲، ۲۰۲۰). در ادامه به شرح برخی از موارد یاد شده پرداخته شده است.

۲-۴-۱ اندود سطحی

اندود سطحی یک لایه چسبنده نازک است که اتصال یکپارچه و محکمی بین سطح لایه قدیمی نسبتاً غیرجاذب و لایه آسفالت جدید ایجاد می‌کند (ای‌اس‌تی‌ام دی ۸ - ۳۰۲، ۲۰۰۴). همچنین بر اساس تعریف آسفالت آنستیتو^۴، اندود سطحی به منظور ایجاد چسبندگی بین لایه موجود و لایه جدید (روکش) به کار می‌رود تا از بروز خرابی‌های زودرس مانند ترک‌های ناشی از جداسازی^۵ جلوگیری کند (آسفالت آنستیتو، ۲۰۰۷).

۲-۴-۱-۱ مقدار اندود سطحی

استفاده بیش از حد از اندود سطحی باعث ایجاد لغزندگی و سرخوردن لایه‌های آسفالتی بر روی یکدیگر می‌شود. با این وجود، بکارگیری مقدار مناسب اندود سطحی باعث افزایش چسبندگی بین لایه‌ای و همچنین کاهش قیمت تمام شده روسازی می‌گردد. همچنین مشاهدات نشان داد که مقدار قیر بهینه لازم برای ایجاد چسبندگی مناسب در بازه ۳۰۰ الی ۴۵۰ گرم بر مترمربع می‌باشد. (راپوسیراس و

¹ West et al.

² Lee et al.

³ ASTM D8-02

⁴ Asphalt institute

⁵ Slippage cracking

همکاران، ۲۰۱۳). لازم به ذکر است که میزان اندود سطحی بهینه با روش آماده‌سازی نمونه نیز تغییر می‌کند. برای مثال در مورد قیر ۶۴-۲۲ PG، میزان قیر مصرفی به عنوان اندود سطحی برای نمونه‌های آماده شده در آزمایشگاه ۰/۲۳ لیتر بر مترمربع و برای نمونه‌های میدانی ۰/۱۸ لیتر بر مترمربع می‌باشد (ژانگ^۱، ۲۰۱۷).

۲-۴-۱-۲ نوع اندود سطحی

نوع اندود سطحی مورد استفاده در بین لایه‌ها تأثیر قابل توجهی بر میزان مقاومت برشی آن دارد. بر اساس روش‌های آماده‌سازی مورد استفاده در صنعت، اندودهای سطحی به سه دسته قیرهای خالص (معمولی)، قیرهای امولسیون (قیرابه) و قیرهای محلول (برگشتی^۲) تقسیم می‌شوند. در میان هر سه نوع اندودهای سطحی، قیرهای امولسیونی به دلیل مشکلات محیطی کمتر، قابلیت اجرای ساده‌تر و مصرف انرژی کمتر محبوبیت بیشتری نسبت به بقیه دارند. قیرهای امولسیون تند شکن، کند شکن و دیر شکن، قیر امولسیونی با سرعت شکست بسیار بالا^۳، قیر امولسیونی اصلاح شده با پلیمر و قیر امولسیونی با شناوری بالا^۴ رایج‌ترین قیرهای امولسیونی مصرفی به عنوان اندود سطحی می‌باشند (وست و همکاران، ۲۰۰۵). در میان قیرهای امولسیونی، قیر ترکلس^۵ بیشترین مقاومت برشی میان‌لایه‌ای را در دمای اتاق (۲۵ °C) و در دمای بالا (۵۵ °C) از خود نشان داده است. با این وجود این نوع اندود سطحی در دمای پایین (۱۰ °C-) شکننده بوده و برای مناطق سردسیر توصیه نمی‌شود (ژانگ، ۲۰۱۷). در طرف دیگر، قیرهای خالص مقاومت برشی بیشتری نسبت به قیرهای امولسیونی ایجاد می‌کنند. در

¹ Zhang

² Cutback asphalt binder

³ Quick set emulsions

⁴ High float emulsions

⁵ Trackless

روسازی‌های تقویت شده با ژئوتکستایل، با توجه به ساختار و مواد بکار رفته در ژئوتکستایل، اغلب از قیرهای خالص با غلظت کم استفاده می‌شود (اسلامی، ۱۳۹۱ و دارماراتنا^۱، ۲۰۱۸).

در این میان اما قیرهای محلول به دلیل مشکلات محیط زیستی، به ندرت به عنوان اندود سطحی استفاده می‌شوند. علاوه براین، بکارگیری این نوع قیر ممکن است باعث ایجاد دو مشکل اساسی در روسازی شود. اولاً به علت عدم گیرایی قیر و روان بودن آن، چسبندگی بین ژئوتکستایل و لایه‌های بالا و پائین روسازی تضعیف شده و یکپارچگی و مقاومت برشی سازه روسازی کاهش پیدا می‌کند، که در این حالت ممکن است ژئوتکستایل بر روی لایه آسفالتی لغزیده و آسفالت کنده شود. ثانیاً مواد حلال موجود در قیر محلول، بر مواد ژئوتکستایل اثر سوء داشته و با تغییر حالت این مواد، خواص مکانیکی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (اسلامی، ۱۳۹۱ و دارماراتنا، ۲۰۱۸).

۲-۴-۲ بافت و زبری سطح و شرایط سطحی

پژوهشگران در مطالعات خود با بررسی شرایط مختلف سطحی از جمله وجود رطوبت و گرد و خاک، مشاهده کردند که در هنگام اعمال رطوبت بر روی اندود سطحی، مقاومت برشی نمونه‌ها به طور قابل توجهی نسبت به حالت عدم اعمال رطوبت، کاهش پیدا می‌کند. (شولار و همکاران^۲، ۲۰۰۴). علاوه براین وجود گرد و غبار مانع چسبیدن اندود به سطح لایه می‌شود، لذا در مطالعات متعددی بیان شده است که سطح لایه تحتانی در هنگام اجرای اندود سطحی، باید بدون هر گونه گرد و غبار باشد (وست و همکاران، ۲۰۰۵ و نشریه شماره ۲۳۴، ۱۳۹۰).

از طرفی نتایج مطالعه راپوسیراس و همکارانش نشان داد که بیشترین میزان مقاومت برشی متعلق به نمونه‌های با بافت زبر و درشت می‌باشد، درحالی‌که کمترین مقدار مقاومت برشی برای نمونه‌های با سطح صاف و بریده شده بدست آمده است (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین در تحقیقی که

¹ Dharmarathna

² Sholar et al.

سام و همکارانش بر روی چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی انجام دادند مشخص شد که با افزایش ابعاد نمونه‌ها، سختی و مقاومت برشی به‌طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است (سام و همکاران^۱، ۲۰۲۰).

۲-۴-۳ درجه حرارت

غالباً توصیه می‌شود دما در هنگام اعمال اندود سطحی نزدیک به دمای اتاق باشد. تحقیقات کلپ و همکارانش نشان داد که با افزایش دما مقاومت چسبندگی کاهش می‌یابد. آنها علت این امر را ویژگی ویسکوالاستیک قیر ذکر کردند. در دماهای کمتر از دمای اتاق، قیر حالت شکننده پیدا کرده و تحت تنش‌های کوچکی گسیخته می‌شود. همچنین در دماهای بالاتر از دمای اتاق - هنگامی که قیر به درجه حرارت نقطه نرمی خود نزدیک می‌شود - به دلیل کاهش کندروانی، چسبندگی آن کاهش یافته و در نتیجه از مقاومت برشی آن کاسته می‌شود (کلپ و همکاران^۲، ۲۰۰۸ و نبی، ۱۳۹۵).

۲-۵ جدایش لایه‌ها و عوامل مؤثر بر آن

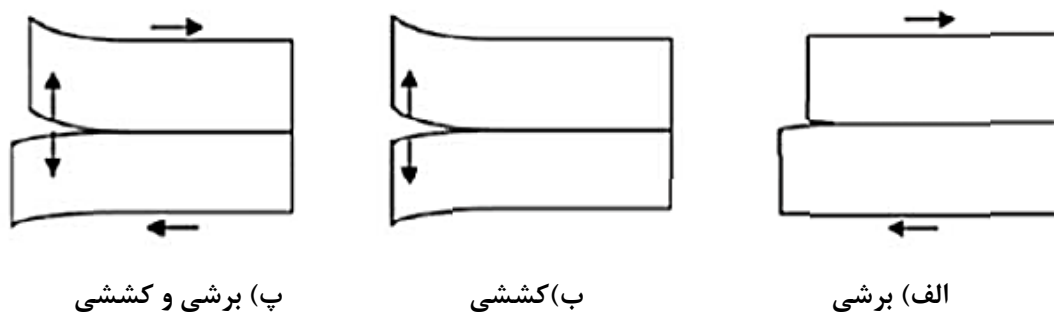
همانطور که بیان گردید، روسازی‌های راه سیستم‌های چندلایه‌ای هستند. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر دوام سازه روسازی، کیفیت چسبندگی لایه‌های آسفالتی می‌باشد. مقاومت چسبندگی میان لایه با قفل‌شدگی مکانیکی سنگدانه و همچنین گیرش و چسبندگی لایه‌ها با قیر مرتبط است (گرزسیک و مالیکی، ۲۰۲۰). این چسبندگی مسئول رفتار تمامی لایه‌ها به عنوان یک سیستم یکپارچه و واحد بوده و از طرفی وظیفه کاهش ترک و تغییر شکل روسازی را برعهده دارد (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳). در صورت ضعف چسبندگی بین لایه‌ای، بار به طور مناسب از لایه فوقانی به لایه تحتانی انتقال نیافته و در

¹ Some et al.

² Collop et al.

این لایه متمرکز می‌شود که در این صورت، روسازی دچار جداشدگی در محل غشاء بین لایه‌ها می‌گردد. (نبی، ۱۳۹۵).

خرابی‌های روسازی ناشی از جدایش^۱ (عدم اتصال) را می‌توان به لایه‌لایه شدن^۲، لغزش، ترک خوردگی بالا به پایین، ترک خوردگی خستگی، ترک‌های طولی و تغییر شکل دائمی طبقه‌بندی کرد. همه این خرابی‌ها منجر به تأثیر سوء بر ایمنی راه و همچنین کاهش عمر خدمت‌دهی روسازی می‌گردد (لی و همکاران، ۲۰۲۰). به طور کلی، گسیختگی‌های ناشی از ضعف اندود سطحی به سه حالت نمایش داده شده در شکل (۵-۲) روی می‌دهند (سوتانتو^۳، ۲۰۱۰).



شکل ۵-۲: حالات مختلف گسیختگی ناشی از ضعف اندود سطحی (سوتانتو، ۲۰۱۰)

گسیختگی برشی یکی از رایج‌ترین نوع گسیختگی در روسازی میدانی می‌باشد که می‌تواند در جهات عرضی و طولی و به دلیل تنش‌های حرارتی و ترافیکی ایجاد شود. این گسیختگی اغلب در محل ترمز گرفتن وسایل نقلیه، دوربرگردان، دور میدان و همچنین در محل تغییر شیب جاده اتفاق می‌افتد (سوتانتو، ۲۰۱۰ و سودارسنان و همکاران^۴، ۲۰۱۶).

همانطور که در شکل (۶-۲) نشان داده شده است، گسیختگی کششی به دلیل تنش کششی قائم

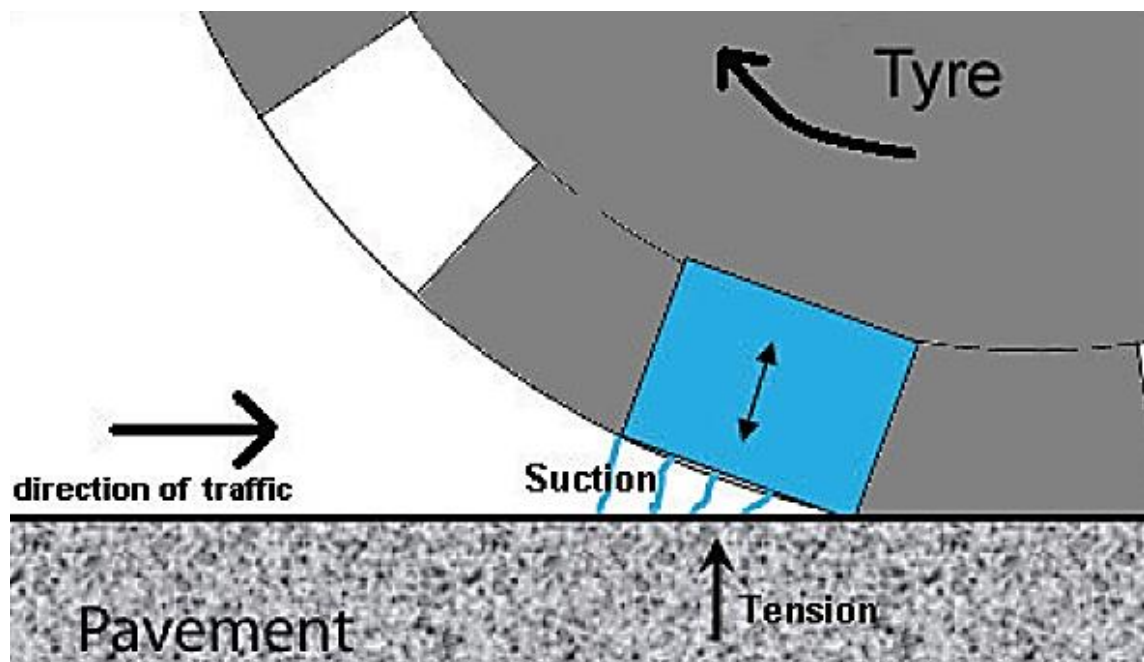
¹ Debonding

² Delamination

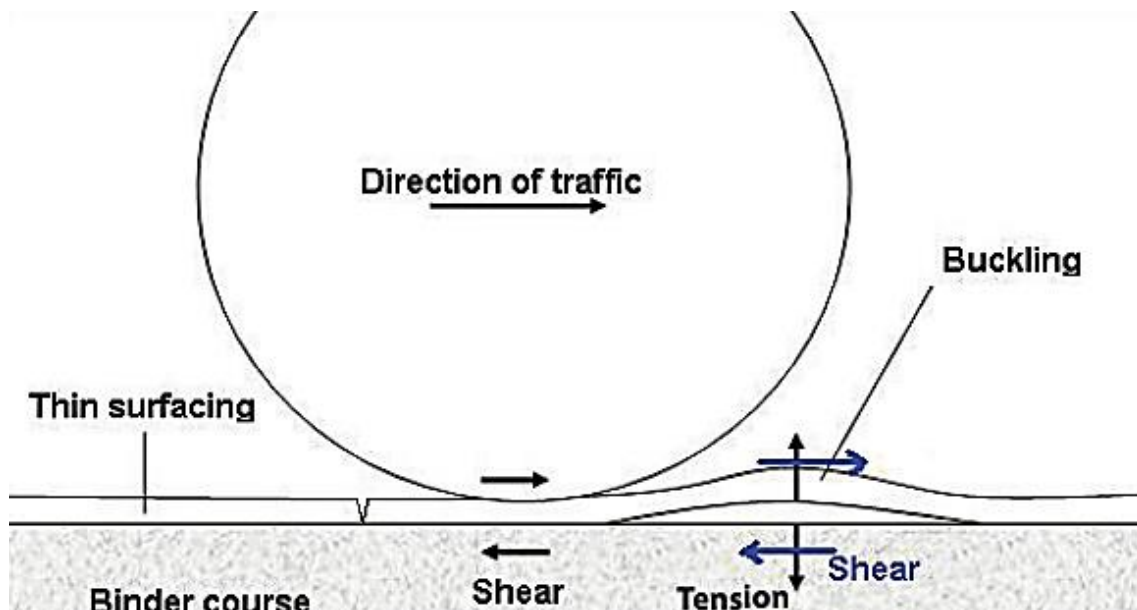
³ Sutanto

⁴ Sudarsanan et al.

ناشی از مکش بین شیارهای تایر وسایل نقلیه و روسازی ایجاد می‌شود. این نوع جدایش که موجب برآمدگی رویه نیز می‌گردد، بسیار غیر متداول بوده و در شرایط روسازی واقعی گزارش نشده است. (سوتانتو، ۲۰۱۰ و سودارسانان و همکاران، ۲۰۱۶). هنگامیکه مقاومت چسبندگی پایین لایه رویه‌ی نازک نسبتاً کم باشد، بارهای افقی در این لایه متمرکز شده و باعث ایجاد پدیده کمانش در لایه رویه و در قسمت جلویی لاستیک وسایل نقلیه می‌شود. در نهایت پدیده کمانش باعث ایجاد تنش قائم شده و در کنار تنش برشی ناشی از بارهای افقی متمرکز در لایه رویه، گسیختگی توأم برشی و کششی را ایجاد می‌کند که به ندرت در روسازی واقعی رخ می‌دهد (سوتانتو، ۲۰۱۰). مکانیزم ایجاد گسیختگی توأم برشی و کششی در روسازی در شکل (۷-۲) نشان داده شده است (سوتانتو، ۲۰۱۰).

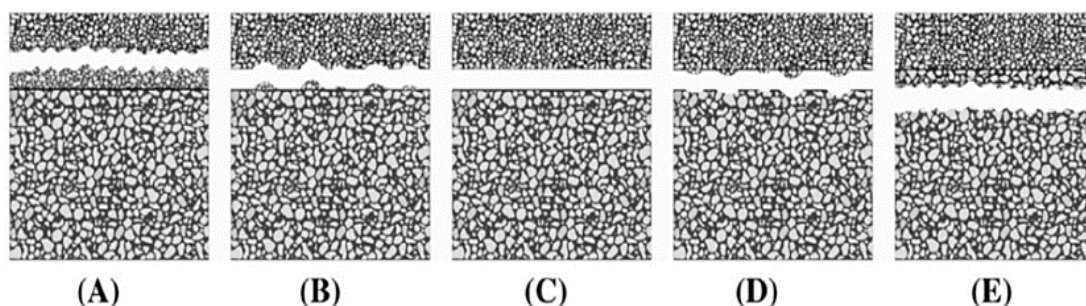


شکل ۷-۲: پدیده مکش تایر در گسیختگی کششی (سوتانتو، ۲۰۱۰)



شکل ۷-۲: مکانیزم گسیختگی توأم برشی و کششی (سوتانتو، ۲۰۱۰)

در طبقه‌بندی دیگری، محققین با استفاده از روش ارزیابی بصری، حالت‌های شکست اتصال لایه‌ها (سطح مشترک لایه‌ها) را مطابق با شکل (۸-۲) در جدول (۱-۲) تشریح نمودند (دستری و ویشر^۱، ۲۰۱۷).



شکل ۸-۲: انواع حالات شکست اتصال لایه‌ها (دستری و ویشر، ۲۰۱۷)

¹ Destrée and visscher

جدول ۱-۲: طبقه‌بندی حالات شکست میان‌لایه مربوط به شکل (۲-۸) (دستری و ویشر، ۲۰۱۷)

طبقه‌بندی	ارزیابی بصری	حالت شکست
A	درون لایه بالایی	پیوستگی
B	بخشی در سطح مشترک بین دو لایه، بخشی در لایه بالایی	ترکیبی
C	در سطح مشترک بین دو لایه	چسبندگی
D	بخشی در لایه پایینی، بخشی در سطح مشترک بین دو لایه	ترکیبی
E	در لایه پایینی	پیوستگی

دلایل اصلی چسبندگی ضعیف بین لایه‌های روسازی هنوز به طور کامل شناخته نشده، اما مهمترین عوامل تأثیرگذار در افزایش خطر شکست لغزشی (برشی) روسازی به دلیل جدایش لایه‌ها به ترتیب زیر می‌باشند (خویر و فوردیس، ۲۰۰۳ و کانستراری و همکاران^۱، ۲۰۱۳):

- نوع مصالح لایه اساس: اگر لایه اساس از مصالح خاصی مانند مخلوط ماکادام مرطوب و یا مصالح ریزدانه خشک تشکیل شده باشد، روسازی بیشتر در معرض شکست برشی قرار می‌گیرد.
- تراکم کم و ناکافی لایه بستر یا زیر اساس و یا اساس: که باعث کاهش سختی لایه‌ها و هدایت مصالح به سمت فروپاشی و تنزل در سطح مشترک و همچنین از دست دادن پیوستگی لایه‌ها می‌گردد.
- جدایش در لایه اساس: که ناشی از حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها و کمبود قیر شکل می‌گیرد. در این فرآیند به دلیل اینکه مقدار زیادی از قیر صرف پوشش ریزدانه‌ها و فیلر

¹ Canestrari et al.

می‌شود، سنگدانه‌های با ابعاد بزرگتر پوشش ضعیف‌تری با قیر پیدا می‌کنند که باعث ایجاد چسبندگی ضعیف لایه‌ها می‌گردد.

- نوع قیر لایه رویه: در صورت استفاده از قیر با ویسکوزیته پایین و دمای بالا، سطح لغزش در سطح مشترک لایه‌ها گسترش می‌یابد.
- شرایط آب‌وهوایی در زمان ساخت روسازی: دما و افت حرارت بین لایه‌ها باید در نظر گرفته شوند. اجرای لایه رویه با مخلوط دمای بالا بر روی لایه بیندر سرد، باعث افزایش خطر لغزش و کاهش مقاومت میان‌لایه‌ای می‌گردد.
- کثیفی و آلودگی سطح لایه پایینی
- جریان آب بین لایه‌ها
- اعمال اندود سطحی کم یا بیش از حد نیاز
- نوع بارگذاری

۶-۲ آزمایش‌های تعیین مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای

براساس شکل دستگاه و نحوه بارگذاری، آزمایشات مخرب ارزیابی مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای به چهار نوع زیر تقسیم می‌شوند (شکل (۲-۹)):

الف) آزمایش پیچش^۱: این آزمایش بیشترین مقدار لنگر پیچشی برشی وارد بر لایه فوقانی را که باعث جدایی آن از لایه تحتانی می‌گردد، اندازه‌گیری می‌کند. عدم توزیع یکنواخت تنش در مرز مشترک و در نتیجه گسیختگی غیریکنواخت نمونه مهمترین ایراد این آزمون می‌باشد (کانستراسی و همکاران، ۲۰۱۳).

ب) آزمایش کشش مستقیم^۲: در این آزمایش بوسیله پیستون به یک نمونه دو لایه‌ای نیروی کششی

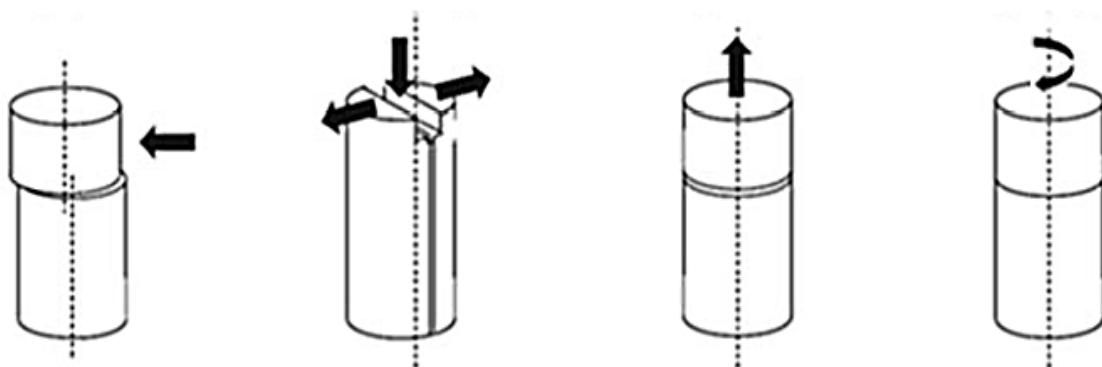
¹ Torque test

² Direct tensile test

وارد می‌شود. در این راستا به منظور اندازه‌گیری تنش گسیختگی، لایه پایینی توسط صفحه فلزی ثابت نگه داشته شده و لایه بالایی بوسیله یک صفحه دیگر در راستای محور (مرکز) خود به سمت بالا کشیده می‌شود. از معایب این آزمایش می‌توان به پراکندگی نتایج آن اشاره داشت (کانستراسی و همکاران، ۲۰۱۳).

پ) آزمایش گوه شکافنده^۱: در این آزمایش ترکی در مرز مشترک یک نمونه دو لایه‌ای حضور داشته که تا جدایی کامل دو لایه پیشروی می‌کند. از معایب غیر قابل اغماض این آزمایش، بارگذاری متفاوت نمونه آزمایشگاهی نسبت به روسازی است که شرایط واقعی را شبیه‌سازی نمی‌کند (نبی، ۱۳۹۵).

ت) آزمایش برش^۲ (مستقیم): این آزمون متداول‌ترین آزمایش برای ارزیابی مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای می‌باشد که در دو حالت با نرخ ثابت جابجایی و با نرخ ثابت بارگذاری انجام می‌پذیرد. در واقع این آزمایش گسیختگی برشی را -به عنوان رایج‌ترین نوع گسیختگی- شبیه‌سازی نموده و می‌تواند به همراه تنش محوری و یا بدون بار محوری (به صورت برش خالص) انجام شود (کانستراسی و همکاران، ۲۰۱۳ و نبی، ۱۳۹۵).



الف) پیچش ب) کشش مستقیم پ) گوه شکافنده ت) برش

شکل ۲-۹: طریقه اعمال بار و گسیختگی در انواع آزمایش‌های مقاومت چسبندگی (کانستراسی و همکاران، ۲۰۱۳)

¹ Wedge splitting test

² Shear test

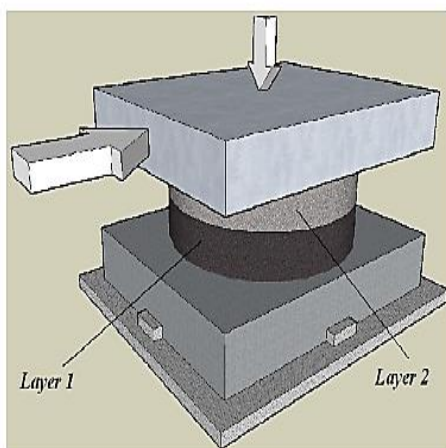
۷-۲ دستگاه‌های انجام آزمایش برش

یکی از اولین مطالعات مرتبط با چسبندگی بین دو لایه آسفالتی در سال ۱۹۷۸ توسط اوزان و همکارانش صورت گرفت. در این تحقیق از دستگاهی برای انجام آزمایش استفاده شد که لایه پایینی توسط میز آزمایش مهار شده بود و همزمان بار عمودی به لایه بالایی و بار افقی ثابت به قالب بالایی اعمال می‌شد (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳ به نقل از اوزان و همکاران، ۱۹۷۸). لاتنر نیز برای ارزیابی چسبندگی بین دو لایه استوانه‌ای دستگاهی را طراحی و ساخت که فقط قادر به محاسبه برش خالص بود و در آن بار عمودی قابل محاسبه نبود. در این دستگاه، بار به لایه بالایی اعمال می‌شد در حالی که لایه پایینی برای محاسبه جابجایی لایه‌ها نسبت به هم، ثابت نگه داشته می‌شد (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳ به نقل از لاتنر^۱، ۱۹۷۹). دستگاه لاتنر به عنوان طرح و نسخه اولیه‌ای برای ساخت دستگاه‌هایی همچون ال پی دی اس^۲ و دستگاه سازمان حمل و نقل فلوریدا^۳ جهت انجام آزمایش برش در مطالعات بعدی مورد استفاده قرار گرفت (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳). در شکل (۲-۱۰) تصویر شماتیک برخی از دستگاه‌های آزمایش برش رایج در تحقیقات گذشته آورده شده است.

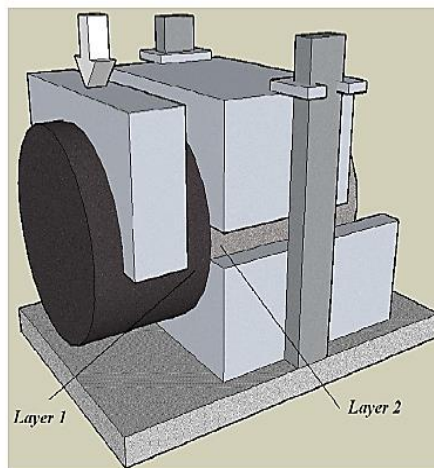
¹ Leutner

² Layer-Parallel Direct Shear (LPDS)

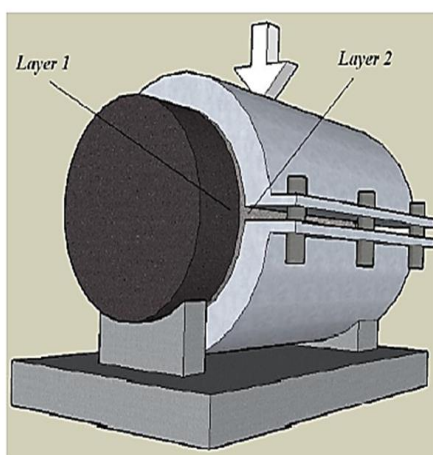
³ Florida department of transportation (FDOT)



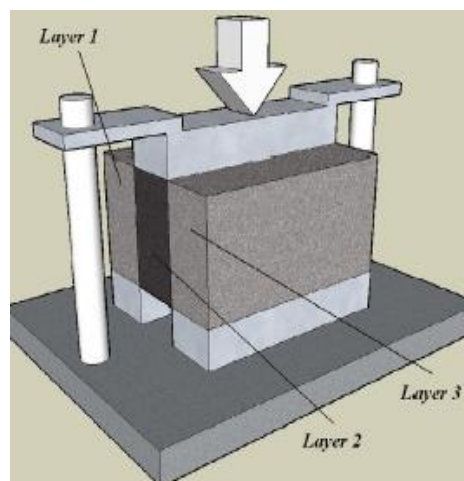
دستگاه برش آسترا



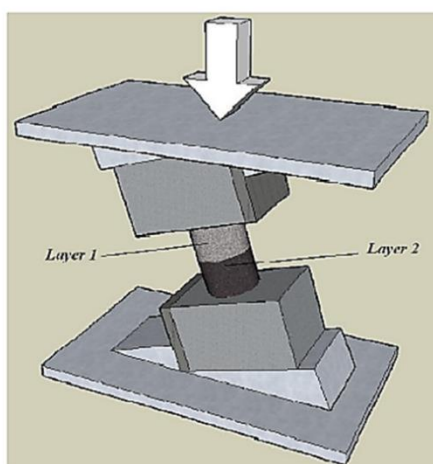
دستگاه برش ال پی دی اس



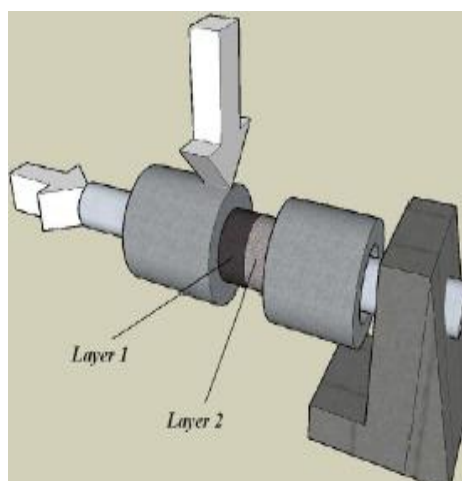
دستگاه برش ال سی بی



دستگاه برش دوبل



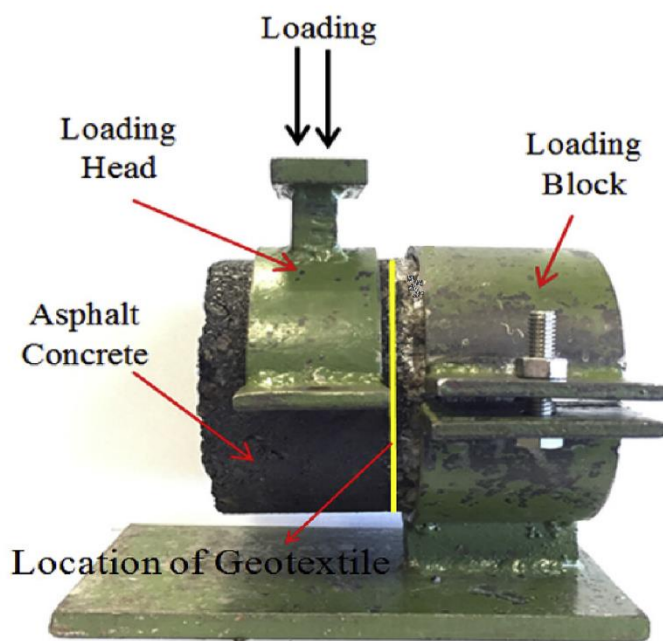
دستگاه برشی خستگی



دستگاه برش مستقیم به همراه نیروی محوری

شکل ۱-۲: دستگاه‌های آزمایش برش (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳)

لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به منظور بررسی مقاومت برشی روسازی‌های مختلط مسلح به ژئوسنتتیک‌ها، بر پایه شیوه‌نامه پی ۶۷ دپارتمان مدیریت بزرگراه‌های فدرال^۱، دستگاه برش مستقیمی را توسعه دادند. این دستگاه نوعی فیکسچر جهت استفاده به کمک دستگاه‌های بارگذاری بزرگ مقیاس آزمایشگاهی بود که این امکان را فراهم می‌نمود تا حداکثر نیروی برشی قابل تحمل در زوج نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتیمتر اندازه‌گیری گردد. این فیکسچر مشابه با دستگاه ال پی دی اس از دو بخش اعمال بار به صورت متحرک و قسمت ثابت نگهدارنده نمونه تشکیل یافته بود. تصویر این فیکسچر در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است (لی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۱۱-۲: فیکسچر برش مستقیم مورد استفاده در پژوهش (لی و همکاران، ۲۰۲۰)

¹ Protocol P67: test method for determination of the shear strength at the interface of bonded layers of concrete

۲-۸ خرابی‌های رطوبتی

حساسیت رطوبتی^۱ را می‌توان پتانسیل عریان‌شدگی^۲ مخلوط‌های آسفالتی نامید که خود می‌تواند مقدمه‌ای برای بروز خرابی‌هایی همچون شن‌زدگی، شیارشدگی، ترک‌خوردگی و ایجاد چاله باشد. عریان‌شدگی عبارت است از جدایش قیر از سنگدانه و یا گسیختگی بافت قیری مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری ترافیکی و حضور همزمان آب (مهرآرا و خدایی^۳، ۲۰۱۳). نوع مخلوط آسفالتی، خصوصیات قیر، ترافیک، خصوصیات و بافت سطحی سنگدانه‌ها، شرایط آب و هوایی و رطوبت، عدم زهکشی مناسب، تراکم و عدم استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی از مهمترین عوامل مؤثر در بروز خرابی رطوبتی (عریان‌شدگی) روسازی آسفالتی به شمار می‌روند (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳).

آب ممکن است از طریق رطوبت سنگدانه‌ها در حین عملیات اختلاط، نفوذ در ترک‌های سطح روسازی، بالا آمدن سطح آب زیر زمینی بر اثر پدیده مویینگی و یا از طریق کناره‌های روسازی به داخل آن نفوذ کند (ایلماز و سارگین^۴، ۲۰۱۲). آسیب اولیه در مخلوط‌های آسفالتی در طی سیکل‌های ذوب و یخ بوسیله بار ناشی از انبساط آب ایجاد شده و از طریق صدمه به سطح بین قیر و سنگدانه و یا شکست مخلوط آسفالت افزایش می‌یابد (سی و همکاران^۵، ۲۰۱۴).

در طی سیکل‌های ذوب و یخ، محدوده دمایی متناوباً از مثبت به منفی تغییر کرده و روسازی متحمل تنش‌های حرارتی و رطوبتی تکراری می‌گردد. زمانی که آب در دردمای پایین در فضای خالی مخلوط آسفالتی به یخ تغییر حالت می‌دهد، مخلوط با تنش ناشی از انبساط یخ مواجه شده و دردمای بالاتر (گرمتر) زمانی که یخ ذوب می‌گردد، ساختار مخلوط آسفالتی نرم و شل می‌شود. انبساط آب، فضای خالی

¹ Moisture susceptibility

² Stripping

³ Mehrara and khodaii

⁴ Yilmaz and sargin

⁵ Si et al.

داخلی مخلوط را افزایش داده و منجر به کاهش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین در اثر آن مقاومت فشاری و مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد. علاوه بر موارد یاد شده، استحکام و مقاومت مارشال با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ کاهش خواهند یافت (م‌حی‌الدین و همکاران^۱، ۲۰۲۰).

اتصال و چسبندگی بین قیر و سنگدانه تحت تاثیر آب به راحتی از سطح سنگدانه جابه‌جا شده (از بین رفته) که باعث تضعیف و بروز پدیده‌ی جریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی می‌گردد (سی و همکاران^۲، ۲۰۱۴). در تحقیقی که توسط صیادی و همکارانش صورت گرفت، مشخص شد که قیر بعد از تجربه سیکل ذوب و یخ، بسیار سخت و شکننده شده که نهایتاً باعث ترک‌خوردگی در روسازی آسفالتی می‌گردد (صیادی و حسامی^۳، ۲۰۱۷). پژوهشی دیگر نشان داد که اثرات منفی رطوبت باعث کاهش مدول آسفالت تا حدود ۲۵ درصد، افزایش خرابی‌های ناشی از خستگی به میزان ۳۰ درصد و همچنین افزایش خرابی شیارشدگی به میزان ۶۰ درصد می‌گردد (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳).

۲-۹ مکانیزم‌های خرابی رطوبتی

خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی به صورت کلی برآمده از دو مکانیزم می‌باشند (شکل (۲-۱۲)) (تارفدر و زمان^۴، ۲۰۱۰ و تقوی زواره، ۱۳۹۳):

الف) از دست دادن چسبندگی^۵ به دلیل حضور آب بین قیر و سنگدانه: از آنجایی که مصالح سنگی با آب بهتر نسبت به قیر ترکیب و مخلوط می‌شوند، بنابراین در حضور آب پیوند قیر و مصالح سنگی

¹ Mohi ud Din et al.

² Si et al.

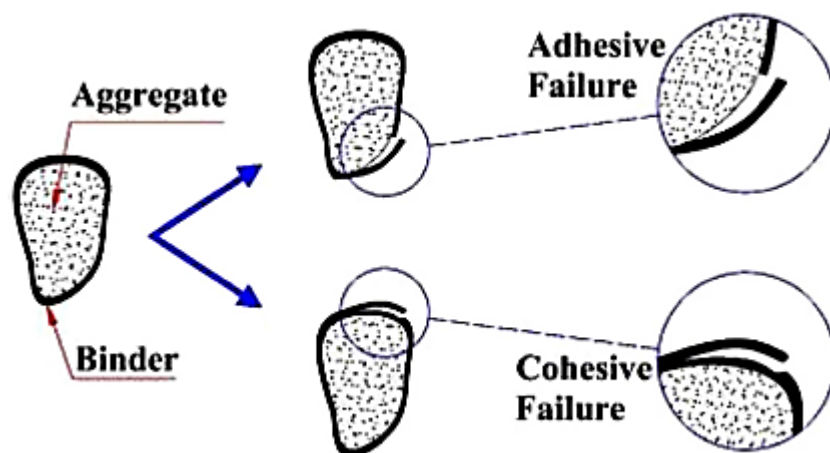
³ Sayadi and hesami

⁴ Tarefder and zaman

⁵ Adhesion

تضعیف شده و در نتیجه با کاهش چسبندگی بین لایه نازک قیر و سطح سنگدانه، عریان‌شدگی مصالح سنگی از لایه قیری رخ می‌دهد.

(ب) از بین رفتن پیوستگی^۱ به دلیل نرم شدن مخلوط قیر-فیلر: در اثر نرم شدن قیر، پیوستگی در مخلوط آسفالتی کاهش یافته که نهایتاً منجر به افزایش نفوذ آب به بدنه روسازی می‌شود.



شکل ۲-۱۲: شکست چسبندگی و پیوستگی به دلیل حضور آب (عامری و همکاران، ۲۰۲۱)

در مطالعه‌ای محققان نشان دادند که مکانیزم خرابی رطوبتی از دو مرحله تشکیل شده است: الف) انتقال رطوبت: فرایندی که در آن رطوبت به حالت مایع و یا بخار آب به مخلوط آسفالتی و قیر نفوذ کرده و به سطح مشترک قیر-سنگدانه می‌رسد. ب) پاسخ سیستم: تغییر در ساختار درونی مخلوط که منجر به کاهش و از دست دادن ظرفیت باربری مصالح می‌گردد (کارو و همکاران^۲، ۲۰۰۹).

همچنین خرابی‌های رطوبتی را می‌توان از دو منظر میکرو و ماکرو مکانیزم مورد مطالعه قرار داد. میکرو مکانیزم‌ها که با تئوری‌های چسبندگی نیز شناخته می‌شوند شامل تئوری مکانیکی، واکنش شیمیایی، جهت‌گیری مولکولی، انرژی سطح و مرز ضعیف هستند. در مقابل ماکرو مکانیزم‌ها در واقع

^۱ Cohesion

^۲ Caro et al.

ترکیبی از تأثیرات و عوامل فیزیکی همچون تنش ناشی از ترافیک، بارگذاری دمایی و نفوذ آب به روسازی می‌باشند (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳).

۲-۱۰ عوامل کاهش‌دهنده خرابی رطوبتی

از آنجا که پدیده عریان‌شدگی بیش‌تر به خاصیت چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی بستگی دارد، لذا برای اصلاح و ترمیم این خرابی باید خواص چسبندگی قیر و سنگدانه‌ها بهبود یابد. بدین منظور می‌توان جهت بهبود و محکم‌تر شدن اتصالات بین قیر و مصالح سنگی، از مواد افزودنی و اصلاح‌کننده‌های قیر استفاده کرد که به صورت فیلر یا مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ذیل به معرفی برخی از مهم‌ترین مواد افزودنی کاهش‌دهنده عریان‌شدگی پرداخته شده است (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳).

۲-۱۰-۱ مواد ضد عریان‌شدگی مایع

یکی از متداول‌ترین رویکردهای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، افزودن مواد ضد عریان‌شدگی به قیر می‌باشد. افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع^۱، عامل‌های شیمیایی فعالی هستند که می‌توانند به هر سه نوع قیر خالص، امولسیون و محلول افزوده شده و با کاهش کشش سطحی و همچنین افزایش قابلیت جذب سنگدانه‌ها، چسبندگی بهتری بین قیر و سطح سنگدانه‌ها برقرار کنند. مقدار بهینه استفاده از این افزودنی برای اختلاط با قیر به میزان ۰/۱ تا ۳ درصد توصیه شده است (الغدی و همکاران^۲، ۲۰۱۴).

^۱ Liquid Antistripping Additive

^۲ Al-qadi et al.

۲-۱۰-۲ استایرن بوتادین استایرن

استایرن بوتادین استایرن^۱ یکی از پلیمرهای با قابلیت ارتجاعی بالا می‌باشد که با کاهش پتانسیل شیارشدگی در تابستان و ترک‌خوردگی در زمستان به وسیله افزایش پایداری، الاستیسیته و سختی قیر، عملکرد کلی روسازی آسفالتی را بهبود می‌بخشد (تارفدر و زمان، ۲۰۱۰). از آنجایی که استایرن بوتادین استایرن در دمای بالا نرم شده، بنابراین به راحتی می‌تواند به قیر اضافه و با آن مخلوط شود (الغدی و همکاران، ۲۰۱۴).

۲-۱۰-۳ آهک هیدراته

استفاده از آهک هیدراته یکی از اولین روش‌های کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. آهک هیدراته مقاومت در برابر عریان‌شدگی را از طریق افزایش چسبندگی بین سنگدانه و قیر و همچنین کاهش کشش سطحی بین قیر و آب، بهبود می‌بخشد. آهک هیدراته معمولاً به میزان ۰/۵ تا ۲ درصد وزن سنگدانه برای اختلاط با قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (الغدی و همکاران، ۲۰۱۴).

۲-۱۱ مروری بر ادبیات عوامل کاهش‌دهنده خرابی رطوبتی

در تحقیقی که در سال ۲۰۱۰ در زمینه تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بر روی خرابی‌های رطوبتی مخلوط آسفالتی توسط ژیاو و همکاران انجام شد، محققان از آهک هیدراته و نوعی عامل ضد عریان‌شدگی مایع^۲ برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط استفاده کردند. در این پژوهش آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم انجام شد و نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک محاسبه گردید. نتایج بدست آمده بیانگر این بود که آهک هیدراته بهترین مقاومت در برابر رطوبت را در مخلوط‌های آسفالتی

^۱ Styrene Butadiene Styrene

^۲ ASA

از خود نشان داده است. همچنین مشاهده شد که ماده‌های ضد عریان‌شدگی مایع توانسته‌اند مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط را افزایش بدهند، اما در مقایسه با آهک هیدراته مقاومت رطوبتی کمتری از خود نشان داده‌اند. به علاوه مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی رطوبتی با افزودنی، کمتر از مقاومت مخلوط‌های بدون افزودنی بود (ژیائو و همکاران^۱، ۲۰۱۰).

در تحقیقی دیگر، اثر افزودنی‌های مختلف و مواد اصلاح‌کننده قیر در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. افزودنی‌های و اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده در این تحقیق، مواد ضد عریان‌شدگی مایع^۲، استایرن بوتان استایرن^۳، اسید پلی فسفوریک^۴ و آهک هیدراته بودند. آزمایش لاتمن اصلاح شده به عنوان آزمون تعیین پتانسیل عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی استفاده شد و نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از افزودنی استایرن بوتان استایرن علی‌رغم افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم، با توجه به آسیب‌پذیری در برابر رطوبت منجر به کاهش نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک^۵ شده است. همچنین استفاده از افزودنی ضد عریان‌شدگی مایع باعث افزایش مقاومت کششی نمونه مرطوب و کاهش مقاومت کششی نمونه خشک شده که منجر به افزایش قابل توجه نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک شده است و در نتیجه کاهش عمرخستگی آسفالت را به همراه داشته است. از طرفی استفاده از افزودنی آهک هیدراته باعث بهبود مقاومت هر دو نمونه خشک و اشباع و افزایش نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک گردید و در نهایت استفاده از افزودنی اسید پلی فسفوریک منجر به تشدید حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شد که به همین دلیل استفاده از آن در کنار مقدار مناسبی از آهک هیدراته و یا ماده ضد عریان‌شدگی مایع توصیه گردید (الغدی و همکاران، ۲۰۱۴).

همچنین در پژوهشی که در سال ۲۰۱۵ توسط نظیری‌زاد و همکارانش صورت گرفت، محققان به

¹ Xiao et al.

² Liquid Anti-Strip (LAS)

³ Styrene Butadiene Styrene (SBS)

⁴ Polyphosphoric Acid (PPA)

⁵ Tensile Strength Ratio (TSR)

بررسی تاثیر دو افزودنی ضد عریان‌شدگی متفاوت شامل آهک هیدراته و نوعی ماده ضد عریان‌شدگی مایع^۱ بر روی مخلوط آسفالتی پرداختند. در این مطالعه حساسیت رطوبتی نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش آب جوشان بوسیله تحلیل تصویری دیجیتال بررسی شد. همچنین آزمایش لاتمن اصلاح‌شده بر روی مخلوط‌هایی شامل ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد افزودنی مایع ضد عریان‌شدگی و نیز مخلوط‌هایی با ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته انجام شد. نتایج مشخص کرد که افزودن آهک هیدراته و مایع ضد عریان‌شدگی باعث افزایش مقاومت رطوبتی در آزمایش لاتمن اصلاح‌شده (نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک) به ترتیب به میزان ۱۳ و ۱۶ درصد شده و مایع ضد عریان‌شدگی با ۰/۴ درصد در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشترین تاثیر را بر روی عریان‌شدگی داشته است (نظیری‌زاد و همکاران^۲، ۲۰۱۵).

در یکی دیگر از مطالعات در سال ۲۰۲۱ در زمینه تاثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بر مقاومت رطوبتی روسازی آسفالتی، عامری و همکارانش از پنج ماده ضد عریان‌شدگی متفاوت شامل زایکوترم^۳، و تمول-۹۵۰^۴، ترا گریپ^۵، ایوونیک^۶ و گریپر ال^۷ در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. محققین در این مطالعه برای ارزیابی خواص چسبندگی و پیوستگی قیر و سنگدانه از روش انرژی آزاد سطح و همچنین برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی بهره بردند. نتایج ارزیابی‌های آزمایشگاهی نشان داد که تمامی افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق خواص چسبندگی و پیوستگی را بهبود بخشیده و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر آسیب رطوبتی افزایش داده است. همچنین مخلوط‌های آسفالتی شامل زایکوترم و و تمول-۹۵۰ در مقایسه با سایر افزودنی‌ها، بیشترین مقاومت را در برابر خرابی رطوبتی از خود نشان

^۱ Iterlene In/400-S

^۲ Nazirizad et al.

^۳ Zycotherm

^۴ WETMUL-950

^۵ TeraGrip

^۶ Evonik

^۷ GRIPPER L

دادند. علاوه بر این ماده‌های ضد عریان‌شدگی زایکوترم، و تمول-۹۵۰ و ترا گریپ در شرایط ناشی از حضور آب، عمل جدایش را کاهش دادند در حالی که ایوونیک و گریپر ال این عمل جدایش را تشدید کرده و افزایش داده‌اند (عامری و همکاران^۱، ۲۰۲۱).

۲-۱۲ آزمایش‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی

ارزیابی میزان حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی به دلیل آثار مخرب پدیده عریان‌شدگی بسیار مهم است. در این زمینه سه نوع تحقیقات کلی شامل مطالعات آماری و عددی، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات میدانی انجام شده است که اکثر این مطالعات در زمینه عریان‌شدگی مربوط به روش‌های آزمایشگاهی می‌باشند. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی نحوه چسبندگی قیر به مصالح سنگی در آزمایشگاه است که به دو گروه کلی آزمایش‌های کیفی و کمی (مقاومتی) تقسیم می‌شوند (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳).

بررسی میزان عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش‌های کیفی^۲ به صورت بصری بوده و سادگی و کم هزینه بودن انجام این آزمایش‌ها مهمترین مزیت به کارگیری آنها می‌باشد. برخی از آزمایش‌های رایج و کاربردی این گروه شامل آزمایش استاندارد آب جوشان (ASTM D-3625)، استاندارد غوطه‌وری استاتیک (ASTM T-182) و نیکلسون (ASTM D-1664) می‌باشد. از مهمترین آزمایش‌های کمی^۳ نیز می‌توان به آزمایش استاندارد لاتمن اصلاح شده (AASHTO T-283) آزمایش استاندارد تراکم-غوطه‌وری (AASHTO T165) و شاخص نسبت مارشال (ASTM D-1559) اشاره کرد (کاووسی و بختیاری، ۱۳۹۴).

¹ Ameri et al.

² Qualitative Experiments

³ Quantitative Experiments

۲-۱۲-۱ آزمایش لاتمن اصلاح شده

همانطور که در قسمت قبل بیان شد، آزمایش لاتمن اصلاح شده (آشتو تی ۲۸۳^۱، ۲۰۰۲) یکی از انواع آزمایش‌های کمی می‌باشد که استفاده از آن برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بسیار متداول است.

برای انجام این آزمایش باید دقت شود که میزان فضای خالی در تمامی نمونه‌های ساخته شده یکسان و به مقدار 7 ± 0.5 درصد باشد که با تنظیم تعداد ضربات چکش مارشال به هنگام تراکم نمونه‌ها، این امر میسر می‌گردد. سپس نمونه‌های ساخته شده به دو گروه خشک (شاهد) و مرطوب تقسیم می‌شوند. برای انجام آزمایش تجهیزاتی مانند قالب و چکش تراکم مارشال، پمپ خلاء همراه با فشار سنج، دسیکاتور، فریزر با توانایی حفظ دمای -18 ± 3 درجه سانتیگراد، ترازو و همچنین حمام آب با توانایی حفظ دمای 60 ± 1 درجه سانتیگراد مورد نیاز می‌باشند.

در هر آزمایش باید حداقل ۶ نمونه با قطر $101/6$ میلیمتر و ارتفاع $63/5$ میلیمتر ساخته شود که سه نمونه در حالت خشک و سه نمونه دیگر در حالت اشباع و پس از طی یک چرخه ذوب و انجماد مورد آزمایش قرار می‌گیرند. بر روی نمونه‌های خشک هیچ‌گونه شرایط رطوبتی اعمال نشده و در دمای محیط نگهداری و تحت آزمایش قرار می‌گیرند. اما نمونه‌های گروه دوم برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد، لازم است به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه داخل محفظه خلاء قرار بگیرند (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲). سپس نمونه‌های مورد نظر تحت یک چرخه یخبندان-ذوب مشابه آنچه که در ادامه شرح داده شده، قرار می‌گیرند. البته مطالعات اخیر نشان‌دهنده وقتی که ۱، ۳ یا ۵ چرخه یخبندان-ذوب به کار می‌رود، تفاوت محسوسی در مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط اعمال شده دیده نمی‌شود، پس اعمال یک چرخه یخبندان-ذوب کافی است (آسفالت تکنولوژی نیوز^۲، ۲۰۰۴).

^۱ AASHTO T 283

^۲ Asphalt technology news

پس از آماده شدن نمونه‌های حالت اشباع، آنها را با ورقه‌های نایلونی پوشانده و به همراه 10 ± 0.5 میلی لیتر آب درون کیسه پلاستیکی دیگری قرار داده و به مدت حداقل ۱۶ ساعت در فریزر دارای دمای 18 ± 3 - درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند. سپس نمونه‌ها از فریزر خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در داخل حمام آب با دمای 60 ± 1 درجه سانتیگراد در حالتی که آب به میزان ۲۵ میلیمتر روی نمونه‌ها را پوشانده باشد، قرار می‌گیرند. پس از آن از حمام آب گرم خارج شده و به مدت ۲ ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد غوطه‌ور می‌شوند. در نهایت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های رطوبتی تعیین می‌شود.

۲-۱۲-۲ کاندیشن (پیش شرایط) های رطوبتی

علاوه بر شرایط رطوبتی موجود در استاندارد لاتمن اصلاح شده، محققان برای ارزیابی مقاومت نمونه‌های آسفالتی، از شرایط رطوبتی دیگری نیز استفاده کردند. در سال ۲۰۱۴ آپییگی و همکاران براساس استاندارد EN 12697-23 آزمایش کشش غیرمستقیم را بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت ۶۰ میلیمتر با استفاده از شرایط رطوبتی متفاوتی انجام دادند. آنها نمونه‌ها را به دو گروه خشک و مرطوب تقسیم کردند. نمونه‌های خشک ساخته شده به مدت ۱۱۶ روز در دمای اتاق بدون اعمال هیچ گونه شرایط رطوبتی حفظ شدند، ولی گروه دوم ابتدا ۷۰ روز تحت رطوبت در حمام آب ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و سپس به مدت ۴۷ روز در دمای اتاق خشک شدند و در انتها آزمایش کشش غیر مستقیم با نرخ ۵۰ میلیمتر بر دقیقه بر روی تمامی نمونه‌ها انجام پذیرفت (آپیگی و همکاران^۱، ۲۰۱۴). در مطالعه دیگری، دو گروه نمونه آسفالتی با استفاده از روش مارشال تهیه گردید. نمونه‌های گروه اول پس از سرد شدن در دمای محیط، به مدت ۴۸ ساعت در آب با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. سپس آنها به مدت

¹ Apeagyei et al.

۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نگهداری شده و در نهایت مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های سری دوم براساس استاندارد ASTM D-1559 پس از خنک شدن در دمای محیط، به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند (سنگول و همکاران^۱، ۲۰۱۲).

طی پژوهشی دیگر، ریکاسنس و همکاران به منظور بررسی تأثیر امولسیون‌های چسبنده با گرما^۲ بر روی اتصال بین لایه‌های آسفالتی از آزمون برش ال سی بی^۳ استفاده نمودند. در این مطالعه علاوه بر نمونه‌های خشک (فاقد کاندیشن رطوبتی)، بررسی‌هایی نیز بر روی نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی قرار گرفته انجام پذیرفت. غرقاب شدن نمونه‌های به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، کاندیشن رطوبتی در نظر گرفته شده بود. نتایج نشان داد که تفاوت محسوسی بین مقاومت نمونه‌های خشک و تحت شرایط رطوبتی قرار گرفته حاصل نشده است (ریکاسنس و همکاران^۴، ۲۰۰۵).

۲-۱۳ ژئوسنتتیک‌ها

اصطلاح ژئوسنتتیک از دو بخش ژئو که مرتبط با فعالیت‌های عمرانی شامل زمین، خاک و سنگ و همچنین سنتتیک که اشاره به مواد ساخته شده توسط انسان دارد (مصنوعات)، تشکیل شده است. اگرچه در تولید ژئوسنتتیک‌ها گاهی از موادی همچون چوب، پشم شیشه^۵ و قیر استفاده می‌شود اما مهمترین مواد کاربردی در تولید این محصولات مسطح اغلب پلیمرهای مصنوعی هستند که از نفت خام بدست می‌آیند. از متداول‌ترین این پلیمرها، می‌توان به پلی اتیلن (PE)^۶، پلی پروپیلن (PP)^۷، پلی

¹ Sengul et al.

² Heat-adhesive emulsion

³ Laboratoriode Caminos de Barcelona

⁴ Recasens et al.

⁵ Fibreglass

⁶ Polyethylene

⁷ Polypropylene

استایرن (PS)^۱ و پلی استر (PET)^۲ اشاره کرد. رشد سریع این محصولات و بکارگیری فراوان آنها در پروژه‌های عمرانی -به خصوص در ۴۰ سال اخیر- به دلیل مزیت‌های ناشی از سازگاری با محیط زیست، قابلیت اجرای سریع و راحت، دسترسی آسان به آنها و همچنین طول عمر مناسب و مقاومت کششی بالای این مواد پلیمری بوده است (شوکلّا، ۲۰۱۷).

ژئوسنتتیک‌ها کاربردهای مختلفی در مهندسی معدن، مهندسی کشاورزی و همچنین پروژه‌های عمرانی و به خصوص در راهسازی دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نقش ژئوسنتتیک‌ها در تسلیح^۴، جداسازی^۵، زهکشی^۶، فیلتراسیون^۷، حفاظ گازها و مایعات^۸ اشاره کرد. این مواد زمانی که در تماس با خاک، سنگ و یا آسفالت قرار می‌گیرند می‌توانند یک یا بیش از یک عملکرد را برعهده داشته باشند (شوکلّا، ۲۰۱۷).

هر ژئوسنتتیکی که به عنوان تقویت‌کننده به کار گرفته می‌شود، وظیفه اصلی مقاومت در برابر تنش‌های اعمالی و جلوگیری از تغییرشکل‌های غیرمجاز ناشی از اعمال بار در سازه (روسازی، خاک) را بر عهده دارد (شوکلّا، ۲۰۱۷). از آنجایی که ژئوسنتتیک‌ها موادی با مقاومت کششی بالا می‌باشند، با قراردادن آنها در داخل خاک یا مخلوط آسفالتی می‌توان مقاومت کششی آنها را تقویت نمود. مسلح کردن روسازی‌های انعطاف‌پذیر را می‌توان به گسیل نیروهای کششی در صفحه مسلح‌کننده تعریف کرد که قادر است نیروی متمرکز را روی سطح وسیعی در بستر پخش کرده و از افزایش بار به صورت موضعی و بیش از ظرفیت باربری آن جلوگیری کند (امیری حسینی، ۱۳۸۳).

نصب ژئوسنتتیک‌ها در رویه‌های آسفالتی شامل چهار مرحله‌ی آماده‌سازی سطح، اجرای اندود

¹ Polystyrene

² Polyester

³ Shukla

⁴ reinforcement

⁵ separation

⁶ drainage

⁷ filtration

⁸ fluid/gas containment

سطحی، قرار دادن ژئوسنتتیک و در نهایت اجرای روکش می‌باشد که آماده‌سازی سطح موردنظر با برداشتن مواد شل و زائد، رفع برآمدگی‌های نوک تیز و گوشه‌دار و در صورت لزوم اجرای اندود نفوذی انجام می‌شود. سطح مورد نظر باید تقریباً صاف، مسطح، خشک و عاری از مواد نفتی و گرد و خاک باشد (امیری حسینی، ۱۳۸۳).

براساس میزان دسترسی به ژئوسنتتیک‌ها، آنها به هفت دسته کلی ژئوگریدها^۱، ژئوتکستایل‌ها^۲، ژئونت‌ها^۳، ژئوکامپوزیت‌ها^۴، ژئوفوم‌ها^۵، ژئوسل‌ها^۶ و ژئوممبرین‌ها^۷ طبقه‌بندی می‌شوند، که از میان هفت دسته فوق ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و ژئوکامپوزیت‌ها برای تقویت روسازی‌های آسفالتی بیشترین کاربرد را دارند.

۲-۱۳-۱ ژئوتکستایل‌ها

ژئوتکستایل‌ها ورقه‌های مصنوعی ساخته شده از جنس پلی‌استر، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن هستند که در یک طبقه‌بندی کلی ساختاری به دو دسته بافته شده^۸ و نبافته^۹ (شبکه نمدی) تقسیم می‌شوند. ژئوتکستایل‌های بافته شده به دلیل نوع اتصال تار و پودی (درهم تنیدگی، الگوی متقاطع) رشته‌های الیاف، دارای مقاومت کششی بالاتری نسبت به ژئوتکستایل‌های نبافته با اتصال مکانیکی (حرارتی، سوزن-کاری، پانچ) هستند (اوفن بیکر^{۱۰}، ۲۰۱۹). شکل (۲-۱۳) انواع ژئوتکستایل‌ها را نشان می‌دهد.

¹ Geogrids

² Geotextiles

³ Geonets

⁴ Geocomposites

⁵ Geofoams

⁶ Geocells

⁷ Geomembranes

⁸ woven

⁹ non woven

¹⁰ Offenbacker



ب) ژئوتکستایل بافته شده



الف) ژئوتکستایل نیافته

شکل ۲-۱۳: انواع ژئوتکستایل (شوگلا، ۲۰۱۷)

۲-۱۳-۲ ژئوگریدها

ژئوگریدها شبکه‌های توری شکل از جنس پلیمر، بازالت و یا کربن هستند که ابعاد شبکه (چشمه) آنها از ژئوتکستایل‌ها بزرگتر و در حدود ۱ تا ۵ سانتیمتر می‌باشد (اوفن‌بیکر، ۲۰۱۹). ژئوگریدها از منظر نحوه اتصال نوارها به یکدیگر، به سه گروه اکستروود شده (برجسته)^۱، پیوندخورده^۲ و بافته شده تقسیم می‌شوند شکل ((۲-۱۴)). همچنین ژئوگریدهای اکستروود شده نیز با توجه به جهت کشیدگی^۳ آنها در هنگام ساخت، به سه دسته یک محوری (تک سویه)^۴، دو محوری (دو سویه)^۵ و سه محوری (چند سویه)^۶ طبقه‌بندی می‌شوند (شوگلا، ۲۰۱۷).

۳-۱۳-۲ ژئوکامپوزیت‌ها

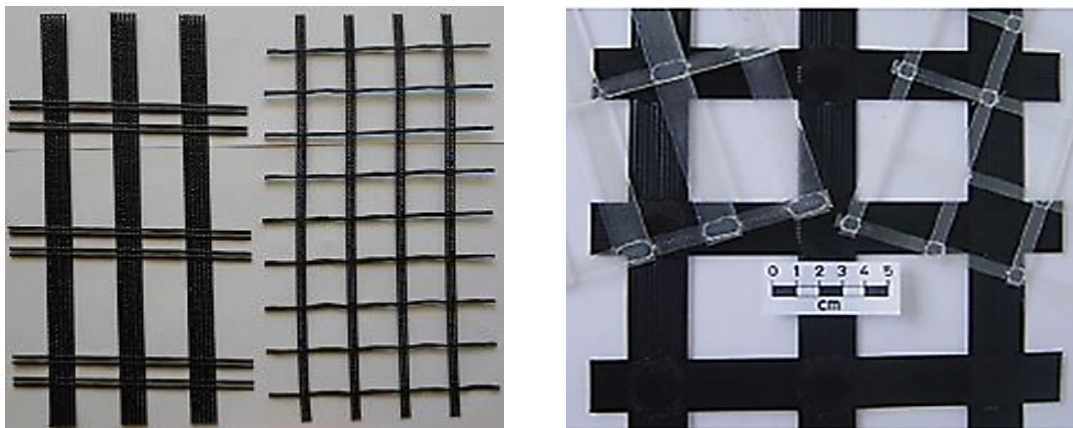
ژئوکامپوزیت‌ها ترکیبی از انواع دیگر ژئوسنتتیک‌ها هستند که برای کاربردها و موقعیت‌های خاص

¹ extruded
² bonded
³ stretching
⁴ Uniaxial
⁵ Biaxial
⁶ Triaxial

طراحی و تولید شده و هدف از ساخت آنها انجام چند وظیفه به طور همزمان است. از متداول ترین ترکیب ژئوسنتتیک ها برای ساخت ژئوکامپوزیت ها، می توان به ترکیب ژئوتکستایل-ژئوگرید که در شکل (۲-۱۵) به تصویر کشیده شده، اشاره نمود (شوکلا، ۲۰۱۷).



ژئوگرید اکستروژده شده: الف) تک محوری ب) دو محوری ج) سه محوری



ژئوگرید پیوند خورده ژئوگرید بافته شده

شکل ۲-۱۴: انواع ژئوگرید (شوکلا، ۲۰۱۷)



شکل ۲-۱۵: ژئوکامپوزیت ژئوتکستایل-ژئوگرید (شوکلا، ۲۰۱۷)

۱۴-۲ مکانیزم‌های تسلیح ژئوسنتتیک‌ها

عملکردهای مختلف ژئوسنتتیک‌های مسلح‌کننده را می‌توان ناشی از سه مکانیزم ذیل دانست:

الف) افزایش ظرفیت باربری بستر

عموماً لایه‌های خاکی روسازی غیرمسلح دچار شکست برشی موضعی می‌شوند. با این وجود، با استفاده از ژئوگرید در این سیستم‌های روسازی می‌توان نوع شکست بستر را با تبدیل به شکست برشی کلی اصلاح کرد. به طور معمول شکست در سیستم روسازی در بستر ضعیف اتفاق می‌افتد، اما با بکارگیری ژئوگرید، محدوده شکست از بستر ضعیف به اساس قوی‌تر جابه‌جا می‌شود (اوفن‌بیکر، ۲۰۱۹).

ب) عضو کششی (غشایی)

این مکانیزم متکی به ویژگی کشش افقی مصالح بوده که باعث ایجاد مقاومت عمودی اضافی می‌شود. هنگامی که لایه‌های روسازی تحت بار ترافیکی تحت خمش قرار می‌گیرند، ژئوگرید به‌طور افقی کشیده می‌شود که این کشیدگی باعث ایجاد تکیه‌گاه و مولفه‌ای اضافی روبه بالا در زیر بار ترافیکی (چرخ) می‌شود. بنابراین بار ترافیکی بزرگتری و یا مدت زمان اعمال بار طولانی‌تری نیاز خواهد بود تا تغییر شکل عمده یا شکست کششی ژئوگرید اتفاق بیفتد (اوفن‌بیکر، ۲۰۱۹).

ج) مهار جانبی

در روسازی انعطاف‌پذیر، از آنجا که لایه روبه در معرض بار ترافیکی قرار می‌گیرد، باعث ایجاد تنش‌هایی رو به پایین و در نتیجه جابجایی سنگدانه‌های موجود در لایه‌های زیرین می‌شود. این روند تا گسترش تغییر شکل دائمی در لایه روبه و در نتیجه ایجاد شیارشدگی ادامه پیدا می‌کند. با کاربرد ژئوگریدها، آنها در برابر این نیروی برشی مقاومت کرده و با توجه به ظرفیت و سختی کششی خود می‌توانند آن را به نیروی کششی تبدیل نمایند و ضمن مقاومت در برابر آن، سبب انتقال این نیرو گردند (اوفن‌بیکر، ۲۰۱۹).

۲-۱۵ مروری بر ادبیات مقاومت چسبندگی میان لایه‌های

ژئوسنتتیکی

در سال ۲۰۱۰ بارازا و همکارانش به بررسی و اندازه‌گیری چسبندگی بین لایه‌های مخلوط آسفالتی و مصالح ژئوسنتتیک قرار گرفته در بین آنها پرداختند. نمونه‌ها به صورت سه لایه مخلوط آسفالتی و به ابعاد $۱۵۰ \times ۳۰۵ \times ۳۰۵$ میلیمتر ساخته شدند که بین هر دو لایه، اندود سطحی و میان لایه ژئوسنتتیکی قرار گرفته بود. بار اعمالی وارد شده با نرخ ثابت ۵ میلیمتر بر دقیقه بر لایه میانی نمونه، باعث لغزش این لایه بین دو لایه خارجی اطراف خود می‌گردید. نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین چسبندگی بین لایه‌ها از طریق ژئوگرید و با مقدار قیر بهینه ۰/۳۰ کیلوگرم بر متر مربع به دست آمده است. از طرفی مشاهده شد که نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های مسلح به ژئومش پلی‌استری^۱ که شامل ژئوتکستایل نیز بوده، بیشترین مقاومت برشی را داشته‌اند (زامورا بارازا و همکاران^۲، ۲۰۱۰).

در مطالعه‌ای دیگر محققان به ارزیابی مقاومت چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی مسلح به میان لایه ژئوسنتتیکی به کمک آزمایش برش مستقیم (لاتنر) بدون بار محوری و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر پرداختند. مشاهدات نشان داد که مقاومت چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی مسلح‌شده به ژئوگرید بین ۲۰ تا ۵۰ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش داشته است (ویتکوس و همکاران، ۲۰۱۱).

همچنین زیلنسکی در سال ۲۰۱۱ به ارزیابی عوامل موثر بر مقاومت چسبندگی میان لایه ژئوسنتتیکی در لایه‌های آسفالتی به کمک آزمایش‌های سختی برشی و مقاومت برشی پرداخت. نتایج تحقیقات او نشان داد که اساساً قدرت چسبندگی میان لایه ژئوسنتتیکی وابسته به نوع مخلوط قیری، نوع ژئوسنتتیک،

^۱ polyester geomesh

^۲ Zamora barraza

نوع و مقدار قیر مورد استفاده برای اشباع و چسبندگی ژئوسنتتیک است. از طرفی مشاهده شد که استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در لایه‌های آسفالتی با مقدار بهینه امولسیون، مقاومت چسبندگی میان‌لایه را حدود ۲ تا ۳ برابر در مقایسه با نمونه بدون ژئوسنتتیک کاهش داده است. همچنین به‌کارگیری ژئوسنتتیک‌هایی که در ابتدا به وسیله قیر یا سایر عوامل چسبنده اشباع شده‌اند، باعث بهبود قدرت چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی و ژئوسنتتیک‌ها شده است (زیلنسکی^۱، ۲۰۱۱).

در تحقیق دیگری، روش‌های مختلف استفاده شده برای اندازه‌گیری چسبندگی بین لایه‌ها و همچنین متغیرها و عوامل موثر بر مقاومت چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از امولسیون چسبنده با گرما^۲، مقدار ۴۵۰ - ۳۰۰ گرم بر متر مربع اندود سطحی، بافت زبر و ناهموار سطح و انجام آزمایش در دمای پایین باعث ایجاد بیشترین مقدار مقاومت چسبندگی در لایه‌های آسفالتی شده است (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۳).

سراید و کومار به بررسی تأثیر میان‌لایه‌های ژئوسنتتیکی بر عملکرد روکش آسفالتی در روسازی از پیش ترک‌خورده پرداختند. آنها در این تحقیق از آزمون برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D5321 و نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه و آزمایش کشش چسبندگی مطابق با استاندارد ASTM D4541 استفاده کردند و دریافتند که هرچند استفاده از میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک گسترش ترک انعکاسی را به تعویق انداخته، اما با انتشار ترک‌ها در راستای افقی، علاوه بر کاهش اتصال لایه‌های جدید و قدیم، منجر به لایه‌لایه شدن روسازی در ناحیه سطح مشترک^۳ بین لایه روسازی قدیم و روکش شده که این تأثیر جدایش در میان‌لایه ژئوگرید دوسویه پلی‌پروپیلن^۴ به‌دلیل سختی اولیه بالا، بیشتر است (سراید و کومار^۵، ۲۰۱۷).

¹ Zieliński

² Heat -adhesive

³ Interface

⁴ bi-axial polypropylene grid

⁵ Saride and kumar

در ادامه تحقیق قبلی، کومار و همکارانش به بررسی خواص برشی میان لایه ژئوسنتتیک واقع شده بین روسازی قدیمی و لایه روکش جدید پرداختند. آنها با استفاده از آزمون برش مستقیم که مطابق با استاندارد ASTM D5321 و نرخ بارگذاری ۱ میلیمتر بر دقیقه انجام شد، مشاهده کردند که استفاده از میان لایه ژئوسنتتیک به دلیل ایجاد سطح مشترک صاف و در نتیجه کاهش اصطکاک بین لایه‌ها، باعث کاهش مقاومت چسبندگی (برشی) بین لایه‌های روسازی جدید و قدیم در ناحیه سطح مشترک شده است (کومار و همکاران^۱، ۲۰۱۷).

سودارسانان و همکارانش نیز در پژوهش خود به ارزیابی مقاومت چسبندگی ژئوسنتتیک‌ها در بین لایه‌های آسفالتی پرداختند. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر ژئوسنتتیک بر مقاومت چسبندگی (برشی) سطح مشترک لایه‌های آسفالتی مسلح شده در دماهای مختلف بود. در این تحقیق برای برآورد مقاومت برشی نمونه‌ها از آزمایش برش لاتنر استفاده شد. نتایج مشخص کرد که با توجه به نوع مصالح ژئوسنتتیک، مقاومت برشی سطح مشترک نمونه‌های مسلح شده نسبت به نمونه‌های کنترلی حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است. از طرفی دیده شد هنگامی که دما از ۱۰ به ۳۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد، از مقاومت چسبندگی نزدیک به ۸۰ درصد کاسته خواهد شد (سودارسانان و همکاران، ۲۰۱۸).

در تحقیقی دیگری به ارزیابی مقاومت چسبندگی ژئوگرید در لایه‌های روسازی آسفالتی پرداخته شد. محققان در این مطالعه برای انجام آزمایش برش، از نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای شکل با قطر ۱۵۰ میلیمتر که در دو ضخامت ۷۵ میلیمتری به روش ژیراتوری متراکم شده بودند، استفاده کردند. همچنین از شش نوع ژئوگرید مختلف از جنس پلی‌استر و فایبرگلاس در بین دو لایه آسفالت ۷۵ میلیمتری به عنوان تقویت کننده استفاده شد. نتایج نشان داد که مقاومت چسبندگی نمونه‌های شاهد (تقویت نشده)، بیشتر از نمونه‌های آسفالتی تقویت شده با ژئوگرید پلی‌استری است. همچنین نمونه‌های آسفالتی تقویت شده با ژئوگرید فایبرگلاس کمترین مقاومت چسبندگی را داشته‌اند. از طرفی مشاهده شد با افزایش

¹ Vinay kumar et al.

ضخامت ژئوگرید و کاهش ابعاد شبکه این تقویت‌کننده‌ها، مقاومت چسبندگی نمونه‌های مسلح کاهش یافته است (والوبیتا و همکاران^۱، ۲۰۱۸).

در مطالعه دیگری در زمینه چسبندگی بین لایه‌ها، محققان به بررسی تأثیر فایبرگلس بر مقاومت برشی بین دو لایه آسفالتی با استفاده از آزمایش لاتنر (برش یکنواخت) پرداختند. آزمایش لاتنر بر روی نمونه‌های دو لایه با قطر ۱۵۰ میلیمتر و با نرخ بارگذاری ثابت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. در این مطالعه از چهار نوع فایبرگلس مختلف و همچنین از قیر امولسیون‌ی در مقادیر مختلف به عنوان اندود سطحی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از فایبرگلس تأثیر منفی در چسبندگی بین لایه‌ها داشته است، به طوری که مقاومت برشی نمونه‌های مسلح ۶۰ درصد مقاومت برشی نمونه‌های شاهد بوده است. همچنین نرخ اعمال اندود سطحی در نمونه‌های مسلح تأثیر بسزایی در چسبندگی داشت به طوری که برای نرخ پایین اعمال اندود سطحی، تأثیر مثبتی در مقاومت برشی نمونه‌ها دیده نشد اما اعمال آن در میزان بالا منجر به افزایش مقاومت برشی همانند مقاومت نمونه‌های شاهد گردید. از طرفی استفاده از پارچه‌های (توری) نبافته در میان شبکه‌های ژئوسنتتیک مصرفی، باعث کاهش قفل‌شدگی و چسبندگی بین لایه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آنها شد (سگنول و همکاران^۲، ۲۰۱۹).

نوری و همکاران نیز به ارزیابی مقاومت چسبندگی لایه‌های آسفالتی مسلح‌شده بوسیله ژئوکامپوزیت با استفاده از دستگاه برش میدانی دانشگاه امیرکبیر که قادر به محاسبه برش خالص همراه با تنش محوری بود، پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که دما مؤثرترین عامل در چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی بوده و پس از آن، میزان اندود سطحی و ابعاد شبکه ژئوکامپوزیت مهم‌ترین نقش را در مقاومت چسبندگی ایفا کرده است (نوری و همکاران^۳، ۲۰۱۹).

¹ Walubita et al.

² Sengul et al.

³ Noory et al.

در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۰ توسط لی و همکارانش بر روی روسازی مختلط انجام شد، مقاومت برشی سطح مشترک روسازی مختلط (بتن پلیمری و آسفالت) مسلح شده به ژئوتکستایل ارزیابی گردید. آنها در این تحقیق از آزمایش برش استفاده کردند و چهار پارامتر مختلف شامل شرایط سطح (زبری و صافی)، نوع عمل‌آوری (شرایط اتاق و اون)، تاثیرات دما (بالا و پایین)، تأثیر ژئوتکستایل (وجود و عدم وجود) در نمونه‌ها را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مقاومت برشی سطح مشترک نمونه‌های مرکب با سطح زبر در مقابل نمونه‌های با سطح صاف، نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط اتاق در برابر نمونه‌های شرایط حرارتی، نمونه‌های آزمایش شده در دمای پایین در مقابل نمونه‌های با دمای بالا و همچنین نمونه‌های تقویت شده با ژئوتکستایل نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود یافته و بیشتر شده است (لی و همکاران، ۲۰۲۰).

در جدول (۲-۲) به بیان خلاصه‌ای از نتایج تحقیقات پیشین انجام شده در زمینه مقاومت چسبندگی میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک‌ی پرداخته شده است.

جدول ۲-۲: مروری بر کارهای گذشته

نویسندگان	نوع آزمون و خروجی	شرایط آزمون	نوع ژئوسنتتیک	اهداف	نتایج
ویتکوس و همکاران (۲۰۱۱)	برش مستقیم (لاتنر) برش خالص	سرعت بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر	ژئوگرید	ارزیابی مقاومت چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی مسلح شده به ژئوگرید بین ۲۰ تا ۵۰ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش داشته است.	مشاهدات نشان داد که مقاومت چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی مسلح شده به ژئوگرید بین ۲۰ تا ۵۰ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش داشته است.
کومار و همکاران (۲۰۱۷)	دستگاه برش منطبق بر استاندارد ASTM D5321 برش همراه با تنش محوری	سرعت بارگذاری ۱ میلیمتر بر دقیقه، نمونه با ابعاد ۳۰۰ × ۳۰۰ × ۵۰ میلیمتر	ژئوگرید ژئوتکستایل ژئوکامپوزیت	بررسی خواص برشی میان لایه ژئوسنتتیک واقعی شده بین روسازی قدیمی و لایه روکش آسفالتی جدید	۱- استفاده از میان لایه ژئوسنتتیک به دلیل ایجاد سطح مشترک صاف و در نتیجه کاهش اصطکاک بین لایه‌ها، باعث کاهش مقاومت چسبندگی (برشی) بین لایه‌های روسازی جدید و قدیم در ناحیه سطح مشترک شده است. ۲- کمترین و بیشترین کاهش در مقاومت چسبندگی سطح مشترک به ترتیب مربوط به میان لایه‌های ژئوکامپوزیت (۱۷ درصد) و ژئوگرید (۴۶ درصد) بود.
سودارسانان و همکاران (۲۰۱۸)	برش مستقیم (لاتنر) برش خالص	سرعت بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر	ژئوتکستایل	ارزیابی مقاومت چسبندگی میان لایه مسلح شده به ژئوسنتتیک در روسازی آسفالتی	با توجه به نوع جنس ژئوتکستایل مصرفی، مقاومت برشی سطح مشترک نمونه‌های مسلح شده نسبت به نمونه‌های شاهد حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافت.

ادامه جدول ۲-۲

۱- مقاومت چسبندگی نمونه‌های شاهد (تقویت نشده)، بیشتر از نمونه‌های آسفالتی تقویت‌شده با ژئوگرید پلی‌استری بود. ۲- نمونه‌های آسفالتی تقویت‌شده با ژئوگرید فایبرگلاس کمترین مقاومت چسبندگی را داشتند.	ارزیابی مقاومت چسبندگی-برشی میان لایه تقویت‌شده با ژئوگرید در لایه‌های روسازی آسفالتی.	ژئوگرید	سرعت بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر	PIN E interface برش خالص	والویتا و همکاران (۲۰۱۸)
۱- استفاده از فایبرگلاس تأثیر منفی در چسبندگی بین لایه‌ها داشته است، به طوری که مقاومت برشی نمونه‌های مسلح ۶۰ درصد مقاومت برشی نمونه‌های شاهد شد. ۲- استفاده از پارچه‌های (توری) نبافته در میان شبه‌کامپوزیت‌های ژئوسنتتیک مصرفی، باعث کاهش قفل‌شدگی و چسبندگی بین لایه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آنها شده است.	بررسی تأثیر فایبرگلاس بر مقاومت برشی بین دو لایه آسفالتی	فایبرگلاس	سرعت بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر	برش مستقیم (لانتیر) برش خالص	سگنول و همکاران (۲۰۱۹)
مقاومت برشی سطح مشترک نمونه‌های مختلط با سطح زبر در مقایسه با نمونه‌های دارای سطح صاف و همچنین نمونه‌های تقویت‌شده با ژئوتکستایل نسبت به نمونه‌های شاهد، بهبود یافته است.	ارزیابی مقاومت برشی سطح مشترک روسازی مختلط (بتن پلیمری و آسفالت) مسلح‌شده به ژئوتکستایل	ژئوتکستایل	سرعت بارگذاری ۱ میلیمتر بر دقیقه، نمونه استوانه‌ای مرکب	دستگاه CBR برش خالص	لی و همکاران (۲۰۲۰)

۲-۱۶ جمع‌بندی

همانطور که در بخش (۲-۱۵) و نیز جدول (۲-۲) دیده شد، اغلب پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تأثیر میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک، بر مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای در روسازی آسفالتی تمرکز داشته‌اند. مطالعاتی در رابطه با تأثیر شرایط رطوبتی بر اتصال قیری (اندود سطحی) بین لایه‌های آسفالتی و اثر آن بر اتصال بین ژئوسنتتیک‌ها با مخلوط آسفالتی ملاحظه نشد. همچنین استاندارد مرتبطی که کاندیشن رطوبتی مناسبی را جهت شبیه‌سازی اثرات رطوبت بر اتصال بین لایه‌های آسفالتی ارائه نماید، یافت نگردید.

فصل سوم:

فعالیت‌های آزمایشگاهی

۳-۱ مقدمه

در این بخش به بیان جزئیاتی در رابطه با مواد و مصالح بکار رفته در تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی از جمله مصالح‌سنگی، قیر، ژئوسنتتیک‌ها و ماده ضد عریان‌شدگی پرداخته شده است. علاوه بر این آزمایش‌های انجام شده نیز معرفی گردیده‌اند.

۳-۲ مشخصات مواد و مصالح مصرفی

در این پژوهش مخلوط آسفالتی داغ مبنای ساخت نمونه‌ها بوده است. در ادامه ابتدا مشخصات اجزای تشکیل‌دهنده این مخلوط‌ها بیان و سپس به سایر مصالح مصرفی پرداخته شده است.

۳-۲-۱ خصوصیات مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش از نوع سیلیسی می‌باشد که از کارخانه آسفالت سیدون شاهرود واقع در استان سمنان تهیه گردیده است. اطلاعات و آزمایش‌های مربوط به کیفیت و مرغوبیت مصالح‌سنگی از کارخانه مذکور دریافت و نتایج آن در جدول (۳-۱) بیان شده است. همچنین نتایج آزمایشات مربوط به تعیین مقادیر وزن مخصوص و میزان درصد جذب آب مصالح‌سنگی، در جدول (۳-۲) آورده شده است.

۳-۲-۲ دانه‌بندی مصالح سنگی

دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش مطابق با دانه‌بندی شماره ۵ جدول (۹-۱) نشریه شماره ۲۳۴، برای لایه رویه (توپکا) روسازی می‌باشد. جزئیات دانه‌بندی مصالح سنگی بکار گرفته شده در جدول (۳-۳) قابل ملاحظه می‌باشد. همچنین محدوده دانه‌بندی به صورت گراف در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.

جدول ۱-۳: مشخصات مربوط به کیفیت مصالح سنگی

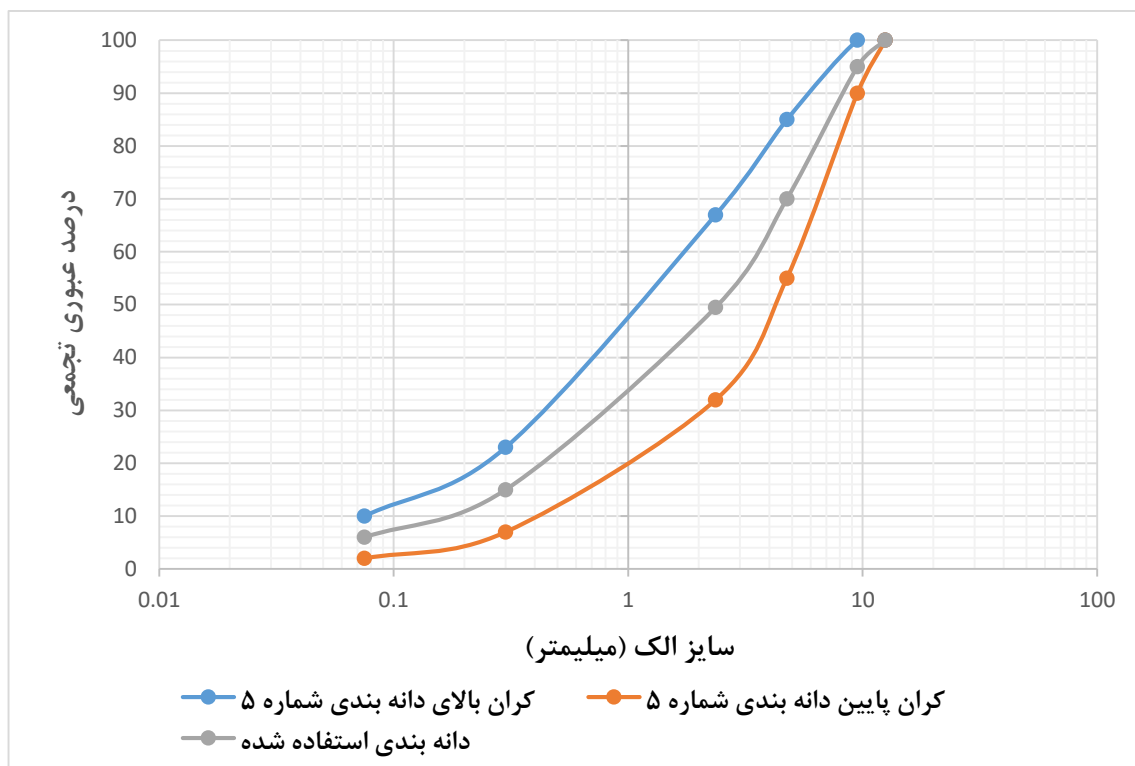
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم AASHTO T 104		درصد دانه‌های B.S:812		درصد چسبندگی قیر به مصالح AASHTO T 182	درصد شکستگی مصالح روی الک نمره (۴)		حدود اتربرگ AASHTO T 89-90			درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس AASHTO T 96			درصد هم‌ارز ماسه‌ای (SE) AASHTO T 176	مشخصات
درشت دانه	ریزدانه	پهن	دراز		در دو جبهه	در یک جبهه	حد روانی LL	حد خمیری PL	دامنه خمیری PI	درصد سایش	دور دستگاه	نوع دانه- بندی		
۰/۲۵	۰/۹۱	۳۱	-	بیشتر از ۹۵ درصد	۸۳	۹۳	-	-	-	۲۶	۵۰۰	B	-	مخلوط شن‌ها
-	-	-	-	-	-	-	غیر قابل تعیین N.P			-	-	-	۵۸	ماسه

جدول ۳-۲: مقادیر وزن مخصوص و میزان درصد جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب مصالح سنگی	وزن مخصوص		شرح
	حقیقی	ظاهری	
۰/۹۸	۲/۶۲۱	۲/۶۹۰	مصالح مانده روی الک نمره ۸
۱/۷۷	۲/۵۷۵	۲/۶۹۸	مصالح رد شده از الک نمره ۸ و مانده روی الک نمره ۲۰۰
-	-	۲/۷۱۴	مصالح رد شده از الک نمره ۲۰۰
۲/۶۱۲			وزن مخصوص حقیقی کل مخلوط مصالح سنگی G_{sb}
۰/۳۵			درصد جذب قیر مخلوط مصالح سنگی P_{ba}
۲/۴۵۹			حداکثر وزن مخصوص مخلوط آسفالت در ۴/۵ درصد قیر G_{mm}
۱/۰۱۵			وزن مخصوص قیر بکار رفته در مخلوط آسفالت G_b

جدول ۳-۳: دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک	درصد وزنی رد شده از هر الک	میانگین حدود مشخصات دانه بندی شماره ۵ (درصد)
۱۲/۵ میلیمتر (۱/۲ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)	۹۰-۱۰۰	۹۵
۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)	۵۵-۸۵	۷۰
۲/۳۶ میلیمتر (شماره ۸)	۳۲-۶۷	۴۹/۵
۱/۱۸ میلیمتر (شماره ۱۶)	-	-
۰/۶ میلیمتر (شماره ۳۰)	-	-
۰/۳ میلیمتر (شماره ۵۰)	۷-۲۳	۱۵
۰/۱۵ میلیمتر (شماره ۱۰۰)	-	-
۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)	۲-۱۰	۶



شکل ۳-۱: محدوده دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده

۳-۲-۳ خصوصیات قیر

قیر مصرفی مورد استفاده جهت ساخت نمونه های آسفالتی و همچنین اعمال اندود سطحی، از نوع خالص ۶۰-۷۰ بوده که از پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران تهیه گردیده است. در جدول (۳-۴)، خواص فیزیکی مربوط به قیر مصرفی بر پایه اطلاعات اخذ شده از شرکت تولیدکننده نشان داده شده است.

۴-۲-۳ مشخصات ژئوسنتتیک ها

به منظور ساخت زوج نمونه های آسفالتی از سه نوع ژئوسنتتیک مختلف استفاده گردیده، که در ادامه مشخصات آنها بیان شده است.

جدول ۳-۴: نتایج آزمایش های انجام شده بر روی قیر پاساگاد تهران

آزمایش	روش آزمایش	واحد اندازه گیری	(۶۰-۷۰)
دانسیته در دما ۲۵ درجه سانتیگراد	ASTM D-7	گرم بر سانتیمتر مکعب	۱/۰۶ - ۱/۰۱
درجه نفوذ در دما ۲۵ درجه سانتیگراد	ASTM D-5	mm/۱۰ درجه	۶۰-۷۰
نقطه نرمی	ASTM D-36	درجه سانتیگراد	۴۹-۵۶
کشش پذیری در دما ۲۵ درجه سانتیگراد	ASTM D-113	سانتیمتر	۱۰۰
نقطه اشتعال	ASTM D-92	درجه سانتیگراد	۲۵۰
حلالیت در دی سولفید	ASTM D-4	درصد	حداقل ۹۹/۵
تست لکه	AASHTO T 102	-	منفی
افت وزنی بر اثر حرارت	ASTM D-6	درصد	حداکثر ۰/۲
اثر افت نفوذ بر حرارت	ASTM D-6 - D-5	درصد	حداکثر ۲۰

۳-۲-۴-۱ ژئوتکستایل آسفالتی PE ۳۰۰

این محصول یک نوع ژئوتکستایل نبافته از جنس پلی استر با وزن ۳۰۰ گرم بر مترمربع بوده که توسط شرکت ژئوپارسیان تولید شده است. ویژگی ها و خصوصیات آن بر پایه کاتالوگ کارخانه، در جدول (۳-۵) آمده است. شکل (۳-۲) تصویر این ژئوتکستایل را به نمایش گذاشته است.

۳-۲-۴-۲ ژئوگرید آسفالتی ۵۰/۵۰

این ژئوگرید از الیاف شیشه (فایبرگلس) با پوشش قیری در ابعاد چشمه ۳۰ × ۳۰ میلیمتر تهیه شده که از نوع پیوند خورده بوده و توسط شرکت ژئوپارسیان تولید گردیده است. این محصول جهت تقویت روکش های آسفالتی و به تأخیر انداختن حرکت ترک های انعکاسی به سمت روکش جدید مورد استفاده قرار می گیرد. خصوصیات این ژئوگرید براساس اعلام کارخانه سازنده به شرح جدول (۳-۶) می باشد. شکل (۳-۳) تصویر این ژئوگرید را نشان می دهد.

جدول ۳-۵: مشخصات ژئوتکستایل

خواص	استاندارد	واحد	۲P ۳۰۰PE
وزن واحد سطح	DIN EN 29073/1	گرم بر متر مربع	۳۰۰
ضخامت	DIN EN 29073/2	میلیمتر	۳.۴
مقاومت کششی (MD)	DIN EN 29073/3	کیلو نیوتن بر متر	۱۲
مقاومت کششی (CD)	DIN EN 29073/3	کیلو نیوتن بر متر	۱۱
مقاومت کشیدگی (MD)	DIN EN 29073/3	%	۵۵
مقاومت کشیدگی (CD)	DIN EN 29073/3	%	۵۰
مقاومت سقوط مخروط (قطر سوراخ)	EN 918	میلیمتر	۱۲
مقاومت سوراخ سی بی آر	DIN EN ISO12236	کیلو نیوتن بر متر	۳
مقاومت یو وی	ASTM D 7238	%	۷۰
مشخصات ابعاد چشمه	DIN EN ISO12956	میکرومتر	۹۳
نفوذپذیری آب (عمودی)	DIN EN ISO11058	10^{-3} متر بر ثانیه	۲.۴
مقاومت کششی قلاب (MD)	ASTM D 4632	نیوتن	۱۲۲۰
مقاومت کششی قلاب (CD)	ASTM D 4632	نیوتن	۱۲۲۰
مقاومت کشیدگی قلاب (MD)	ASTM D 4632	%	۴۵
مقاومت کشیدگی قلاب (CD)	ASTM D 4632	%	۴۹
مقاومت گسیختگی دوزنقه‌ای (MD)	ASTM D 4533	نیوتن	۳۹۵
مقاومت گسیختگی دوزنقه‌ای (CD)	ASTM D 4533	نیوتن	۳۶۵
شاخص مقاومت سوراخ‌شدگی	ASTM D 4833	نیوتن	۵۶۰



شکل ۳-۲: ژئوتکستایل نبافته مورد استفاده

جدول ۳-۶: مشخصات ژئوگرید

خواص	واحد	GP Asphalt ۵۰/۵۰
بیشترین مقاومت کششی	کیلونیوتن بر متر	۵۰
MD	کیلونیوتن بر متر	۵۰
CD		
مقاومت در کرنش 10 ± 2 درصد	کیلونیوتن بر متر	۴۵/۴۵
مدول الایسیسته الیاف شیشه‌ای	مگاپاسکال	۷۲۰۰۰
ابعاد چشمه الیاف شیشه‌ای	میلیمتر	۳۰ × ۳۰
نقطه ذوب (ASTM D 276)	درجه سانتیگراد	الیاف شیشه‌ای غیرقابل احتراق و دارای مقاومت حرارتی تا 400°C می‌باشد.
ابعاد (قالب) موجود		
عرض	میلیمتر	۳/۸ ۵/۰
طول	میلیمتر	۵۰ ۵۰



شکل ۳-۳: ژئوگرید آسفالتی مورد استفاده

۳-۴-۲-۳ توری مشبک

همان گونه که در فصل گذشته به آن اشاره گردید یکی از انواع ژئوگریدهای مورد استفاده در راهسازی، ژئوگریدهای اکستروود شده می‌باشند. از آنجا که برای انجام پژوهش حاضر امکان دسترسی به این نوع ژئوگرید وجود نداشت، یکی از محصولات مشابه با آنها از منظر خصوصیات فیزیک سطحی، انتخاب و جایگزین گردید. این مصالح جایگزین شده تحت عنوان توری‌های مشبک شناخته می‌شوند.

توری‌های مشبک از پلاستیک ساخته شده و از جنس پلی اتیلن سنگین می‌باشند. این مواد در طی فرآیندهایی چون گسترش، اکستروژن و یا بافندگی تولید می‌شوند. از آن جایی که مواد پلاستیکی به تنهایی نمی‌توانند در برابر شرایط بد آب و هوایی و نور خورشید مقاومت کنند مواد دیگری نیز به آنها افزوده می‌شود. از جمله این مواد، می‌توان به مواد مقاوم در برابر اشعه ماورابنفش (UV) اشاره کرد. این افزودنی‌ها باعث می‌شوند تا توری‌ها در برابر نور خورشید مقاوم گردند. از مهمترین ویژگی‌ها و مزایای این محصولات می‌توان به مقاومت کششی بسیار بالا، مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی و عوامل خورنده، ضد زنگ، وزن بسیار کم و نصب آسان، مقاومت بالا در برابر رطوبت و آب و همچنین انعطاف‌پذیری

مناسب آنها اشاره کرد. در این تحقیق از توری‌های پلاستیکی مشبک متعلق به شرکت پارس مش پلیمر استفاده گردید. در شکل (۴-۳) تصویر این توری مشبک مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۳: توری مشبک مورد استفاده

۳-۲-۵ افزودنی ضد عریان‌شدگی

در این تحقیق از تگو ادیبیت ال ۱۳۰۰ به عنوان افزودنی ضد رطوبت و عامل اصلاح‌کننده قیر در اندود سطحی استفاده شد. این محصول یک افزودنی مایع بوده که بر پایه پلی‌آمین‌های اسید چرب می‌باشد. تگو ادیبیت ال ۳۰۰ بدون مواد حلال بوده و قابل پمپاژ شدن در دمای اتاق است. این محصول توسط شرکت تدبیر تجارت آرمان پویا در ایران عرضه می‌گردد. خواص فیزیکی این افزودنی در جدول (۷-۳) آمده است.

۳-۳ مراحل و شیوه ساخت نمونه‌های مورد آزمایش

فرآیند کلی ساخت نمونه‌های مورد آزمون بدین نحو بوده که ابتدا، به صورت جداگانه، نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی ساخته شدند. سپس با توجه به نوع اندود مصرفی و ژئوسنتتیک مورد استفاده، دو

¹ TEGO Addibit L 300

استوانه آسفالتی به یکدیگر متصل گردیده تا یک زوج نمونه را تشکیل دهند. در ادامه به صورت گام به گام نحوه ساخت زوج نمونه‌های استوانه‌ای تشریح شده است.

جدول ۳-۷: مشخصات فیزیکی تگوا دیبیت ال ۳۰۰

شکل ظاهری	مایع شفاف
بخش فعال	۱۰۰ درصد
ویسکوزیته	متوسط
ارزش اسیدی	۳۵
ارزش آمین	۱۵۰
میزان آب	۲ درصد

۳-۳-۱ تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی

جهت شروع فرآیند آزمایش، ابتدا مصالح سنگی در دمای ۱۵۰ تا ۱۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شدند تا از عدم رطوبت در آنها اطمینان حاصل شده و همچنین به دمای مناسب برای اختلاط با قیر دست پیدا نمایند. سپس قالب‌های مارشال را در گرمچال (اُون) قرار داده تا با سنگدانه‌ها هم دما شوند. در گام بعد قیر تا دمای ۱۲۰ الی ۱۴۰ درجه سانتیگراد گرم شده و با مصالح سنگی که از پیش توزین شده بودند، مخلوط گردید. پس از اختلاط قیر و سنگدانه، مخلوط آسفالتی داغ تهیه شده به درون قالب‌های مارشال با قطر داخلی ۱۰ سانتیمتر که از پیش روغن کاری شده بودند، انتقال داده شدند. در ادامه جهت تراکم، قالب به همراه مخلوط آسفالتی درون آن، به زیر چکش مارشال که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است، انتقال داده شد تا وزنه ۴/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۵ سانتی متری روی آن فرود آمده و عمل تراکم صورت گیرد.

در گام نخست این مطالعه برای هر طرف نمونه‌های آسفالتی، تعداد ۵۰ سقوط وزنه اعمال شد. پس

از گذشت نزدیک به ۳ ساعت از اتمام فرآیند تراکم، نمونه‌ها به کمک جک هیدرولیکی از درون قالب خارج شد. به این ترتیب ۱۸ نمونه مارشال ساخته شد که برای هر درصد قیر (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵)، ۳ نمونه در نظر گرفته شد. پس از فرآیند ساخت نمونه‌ها و توزین آنها در آب (حالت غوطه‌وری)، هوا (حالت خشک) و همچنین در حالت اشباع با سطح خشک (SSD^۱)، به انجام آزمایش ارشمیدس براساس استاندارد ASTM D 2726 و محاسبه وزن مخصوص حقیقی نمونه‌ها (G_{mb} ^۲) با استفاده از رابطه (۱-۳) پرداخته شد.

$$G_{mb} = \frac{w_a}{w_{ssd} - w_w} \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

در این رابطه G_{mb} : وزن مخصوص حقیقی نمونه، w_a : وزن نمونه آسفالتی در هوا بر حسب گرم، w_{ssd} : وزن نمونه اشباع با سطح خشک بر حسب گرم و w_w : وزن نمونه در آب بر حسب گرم می‌باشند. در گام بعد جهت محاسبه وزن مخصوص حداکثر مخلوط آسفالتی (G_{mm} ^۳)، ابتدا یک ارلن تمیز، یکبار خالی و بار دیگر حاوی آب تا خط نشانه مشخص، توزین شد و سپس میزان ۱۲۰ گرم نمونه آسفالتی خرد شده را جدا کرده و به درون ارلن مذکور انتقال داده شد و تا چند سانتیمتر بالای آنها با آب پر شد. درپوش ارلن حاوی آب و مصالح خرد شده بسته، و به دستگاه مکش هوا (دستگاه رایس) متصل گردید تا هوای درون منافذ مخلوط آسفالتی خارج شود. برای تسریع این عمل، هر چند دقیقه یکبار ارلن تکان داده شد. عملیات تخلیه هوا تا زمان خروج کامل حباب‌های هوا از میان خلل و فرج مخلوط آسفالتی خرد شده ادامه پیدا کرد. پس از اطمینان از خروج کامل هوا، ارلن از دستگاه جدا شده و تا خط نشانه از پیش تعیین شده با آب پر گردید. وزن ارلن در این حالت نیز اندازه‌گیری و ثبت شد. در نهایت وزن مخصوص حداکثر مخلوط آسفالتی با استفاده از رابطه (۲-۳) محاسبه شد.

^۱ Saturated surface dry

^۲ Bulk specific gravity

^۳ Maximum specific gravity



ب) دستی



الف) اتوماتیک

شکل ۳-۵: چکش تراکم مارشال

$$G_{mm} = \frac{w_a}{w_a - (w_{w+s} - w_f)} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

در رابطه فوق G_{mm} : وزن مخصوص حداکثر نمونه، w_a : وزن نمونه آسفالتی در هوا بر حسب گرم،
 w_{w+s} : وزن ارلن محتوی آب تا خط نشانه و نمونه بدون هوا بر حسب گرم و w_f : وزن ارلن پر از آب
تا خط نشانه بر حسب گرم می‌باشند.

همچنین درصد فضای خالی (هوا)^۱ آسفالت متراکم شده از رابطه (۳-۳) بدست آمد.

^۱ Air void

$$P_a = 100 \times \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

در این رابطه P_a : درصد فضای خالی و همانطور که در روابط قبلی بیان شد G_{mb} : وزن مخصوص حقیقی نمونه و G_{mm} : وزن مخصوص حداکثر نمونه می باشد.

در انتها پس از توزین و ثبت قطر و ارتفاع نمونه ها، آنها به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در آب ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شده اند. سپس آنها داخل جک (فک) دستگاه مارشال نشان داده شده در شکل (۶-۳) قرار گرفته و با سرعت ۵۰/۸ میلیمتر بر دقیقه بارگذاری شدند.

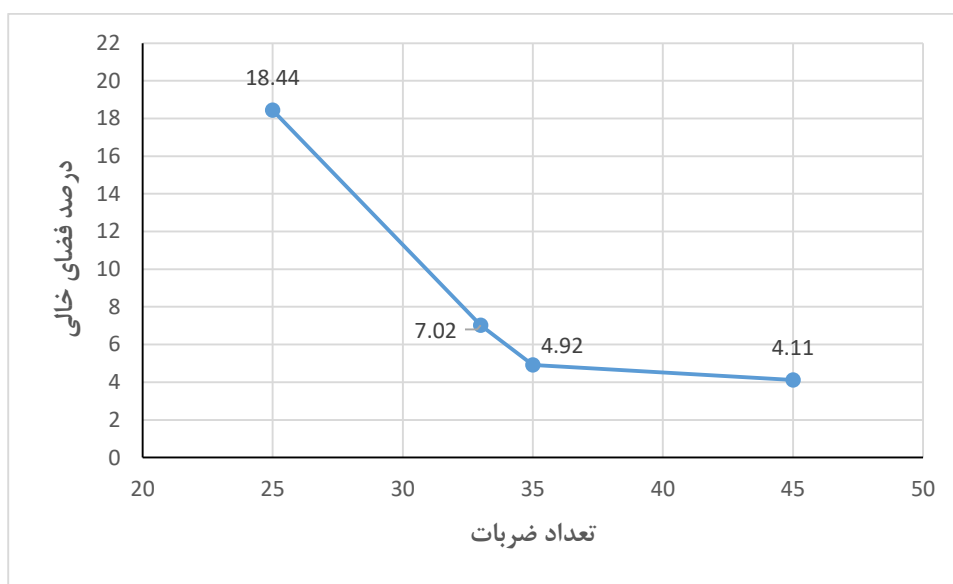
در گام بعد به محاسبه استقامت مارشال که معادل حداکثر نیروی لازم جهت گسیخته شدن نمونه آسفالتی برحسب کیلوگرم و همچنین روانی که مقدار تغییر شکل قطری نمونه مخلوط آسفالتی متراکم شده در هنگام گسیختگی بر حسب ۲۵ صدم میلیمتر بوده، پرداخته شد. ضمناً بعد از محاسبه استقامت مارشال، با توجه به حجم نمونه و مقایسه آن با نمونه استاندارد، ضریب تصحیح استقامت بدست آمده و در آن ضرب شد که در انتها این عدد به عنوان استقامت نمونه معرفی گردید. در نهایت بر پایه سیستم طرح اختلاط مارشال و با توجه به مقادیر استقامت و روانی مارشال، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی به منظور وجود ۴ درصد فضای خالی در کل مخلوط بدست آمد. میزان قیر بهینه مخلوط های مورد بررسی در این مطالعه، ۵/۷ درصد، معادل ۷۲/۵ گرم برای مخلوط مصالح سنگی ۱۲۰۰ گرمی، تعیین گردید.



شکل ۶-۳: نحوه قرارگیری نمونه در جک مارشال

۳-۲ ساخت زوج نمونه‌های آسفالتی

نخستین گام پس از تعیین درصد قیر بهینه، مشخص نمودن تعداد ضربات چکش متناسب با میزان فضای خالی هدف است. بر پایه توصیه استاندارد AASHTO T283 و مطالعه (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲)، میزان فضای خالی نمونه‌های آسفالتی جهت اشباع‌سازی بین ۵۵ تا ۸۰ درصدی، باید 7 ± 0.5 درصد باشد. بدین منظور در یک فرآیند سعی و خطا، تعداد ضربات چکش مارشال جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی در برابر میزان فضای خالی حاصل شده ترسیم شد تا از طریق درون‌یابی، تعداد ضربات چکش متناسب با فضای خالی ۷ درصد تعیین گردد. این تعداد ضربات با توجه به نمودار شکل (۳-۷)، ۳۳ عدد بدست آمد.



شکل ۳-۷: نمودار تعداد ضربات در برابر فضای خالی

در گام بعد نسبت به ساخت نمونه‌های مارشال با وزن 1200 ± 1 گرم، به قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع 7 ± 0.3 سانتیمتر اقدام گردید. جهت ساخت نمونه‌های مسلح‌شده به میان‌لایه ژئوسنتتیک، ابتدا ژئوسنتتیک مورد نظر را در کف قالب قرار داده و سپس سنگدانه و قیر مخلوط شده بر روی آن ریخته شدند. در ادامه به کمک چکش مارشال، با ۳۳ ضربه یک طرف آن را متراکم شده و سپس نمونه را برعکس نموده و طرف دیگر آن نیز با همین تعداد ضربه متراکم گردید. شکل (۳-۸) تصاویر مرتبط با

این فرآیند را نشان می‌دهد. در انتها، با اعمال مقدار معینی از اندود سطحی (در بخش ۳-۳-۳ توضیح داده شده است) دو نمونه استوانه‌ای به نحوی به یکدیگر متصل شدند که ژئوسنتتیک در بین دو نمونه (یکی مسلح و دیگری ساده) واقع گردیده و تشکیل یک زوج نمونه مسلح‌شده را بدهند. فرآیند مشابهی نیز جهت ساخت نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک انجام پذیرفت. در انتها، به منظور توزیع هرچه یکنواخت‌تر قیر اندود سطحی، زوج نمونه‌های ساخته شده پیش از اعمال کاندیشن رطوبتی به مدت ۲۵ روز در دمای اتاق نگهداری شدند. شکل (۳-۹) تصویر بخشی از زوج نمونه‌های ساخته شده را نشان داده است.



شکل ۳-۸: تصاویری از ساخت نمونه‌های آسفالتی دارای ژئوسنتتیک

۳-۳-۳ اندود سطحی

به منظور اعمال اندودهای سطحی، نمونه‌ها به چهار گروه شاهد (بدون ژئوسنتتیک)، مسلح‌شده با ژئوگرید، مسلح‌شده با ژئوتکستایل و مسلح‌شده با توری مشبک تقسیم شدند. مقدار اندود سطحی مصرفی در سطح مشترک دو نمونه استوانه‌ای، با توجه به مساحت سطح نمونه‌ها و نوع ژئوسنتتیک هر گروه، مطابق جدول (۳-۸) محاسبه گردید.



شکل ۳-۹: زوج نمونه‌های نهایی ساخته شده

جدول ۳-۸: مقدار اندود سطحی مصرفی در سطح مشترک دو لایه

نوع ژئوسنتتیک	میزان اندود سطحی توصیه شده (گرم بر متر مربع)	مرجع توصیه کننده	میزان اندود سطحی اعمال شده (گرم)
بدون ژئوسنتتیک	۵۱۷/۵	(بیگلری و همکاران، ۱۳۹۶) به نقل از (اوزان و همکاران، ۱۹۷۸)	۴/۱
ژئوتکستایل	۱۱۰۰	شرکت تولیدکننده	۸/۶
ژئوگرید	۴۵۰	شرکت تولیدکننده	۳/۵
توری مشبک	۴۵۰	بر پایه ژئوگرید	۳/۵

اندودهای سطحی اعمال گردیده جهت اتصال نمونه‌های آسفالتی بر پایه قیر خالص ۷۰-۶۰ و در دو گروه اصلاح شده و نشده تهیه گردیدند. با توجه به توصیه شرکت عرضه کننده افزودنی ضد عریان‌شدگی تگو ادیپیت ال ۳۰۰، مقادیر ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد از افزودنی مذکور با مقادیر مشخص شده برای قیر

بر مبنای جدول (۳-۸)، ترکیب شدند تا اندودهای سطحی اصلاح شده فراهم گردند. فرآیند اعمال اندودهای سطحی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: نحوه اعمال اندودهای سطحی

۳-۴ اعمال کاندیشن‌های رطوبتی

جهت ارزیابی تأثیرات درازمدت رطوبت بر مقاومت اتصال نمونه‌های آسفالتی دو کاندیشن رطوبتی متفاوت در این پژوهش لحاظ گردید: الف) کاندیشن رطوبتی پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 و ب) یک کاندیشن رطوبتی پیشنهادی به صورت غرقابی. بدین منظور نمونه‌ها به سه گروه نمونه‌های خشک (بدون اعمال شرایط رطوبتی)، نمونه‌های ذوب و یخ (کاندیشن AASHTO T283) و نمونه‌های غرقابی (روش پیشنهادی) تقسیم‌بندی شدند. هر دو گروه نمونه‌های ذوب و یخ و غرقابی بر پایه استاندارد AASHTO T283 و بر اساس (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲)، برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد به مدت یک دقیقه و در فشار ۴۵۰ میلیمتر جیوه تحت شرایط خلاء قرار گرفتند (شکل (۳-۱۱)). میزان فضای خالی نمونه‌ها از رابطه (۳-۴) و درجه اشباع از روابط (۳-۵) تا (۳-۶) به دست آمدند.

$$V_a = \frac{P_a \times E}{100} \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

که در این رابطه V_a : حجم فضای خالی بر حسب سانتیمتر، P_a : درصد فضای خالی، E : حجم

نمونه بر حسب سانتیمتر مکعب می‌باشد.

$$J = B - A \quad \text{رابطه (۵-۳)}$$

در این رابطه J : حجم آب جذب شده بر حسب سانتیمتر مکعب، B : وزن نمونه اشباع سطح خشک و A : وزن نمونه خشک بر حسب گرم است.

$$S = \frac{J \times 100}{V_a} \quad \text{رابطه (۶-۳)}$$

که در آن S : درجه اشباع نمونه و همانطور که در روابط قبلی ذکر شد، V_a : حجم فضای خالی و J : حجم آب جذب شده می‌باشد.

در گام بعد، نمونه‌های اشباع شده گروه ذوب و یخ منطبق بر مشخصات بیان شده در استاندارد AASHTO T283 بسته‌بندی گردیده و سپس مطابق شکل (۳-۱۲) به مدت ۲۰ ساعت در داخل فریزر با دمای 3 ± -18 درجه سانتیگراد قرار گرفته و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در داخل حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. نمونه‌های اشباع شده گروه غرقابی در این گام، تنها به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط داخل حوضچه آب قرار گرفتند. سطح آب حوضچه به نحوی در نظر گرفته شده بود که آب بتواند بالای تمام نمونه‌ها را کاملاً بپوشاند (شکل (۳-۱۳)). لازم به ذکر است که در این مرحله هیچ‌گونه عملیات اشباع‌سازی و کاندیشن بر روی نمونه‌های خشک انجام نپذیرفت.



شکل ۳-۱۱: اشباع‌سازی نمونه‌ها بوسیله پمپ خلاء و دسیکاتور



الف) نمونه‌های قرار گرفته در فریزر



ب) نمونه‌های قرار گرفته در حمام بن ماری
شکل ۳-۱۲: اعمال کاندشین ذوب و یخ



شکل ۳-۱۳: حوضچه اعمال کاندیشن غرقابی

۳-۵ آزمایش برش مستقیم

آزمون برش مستقیم با استفاده از یک دستگاه بارگذاری خمشی، ساخت شرکت زویک/رول^۱ آلمان، از نوع قاب صلب بسته (UTM) با حداکثر ظرفیت ۱۵ تن انجام پذیرفت. به این منظور، از فیکسچر مخصوصی که قابلیت نصب در دستگاه مذکور را داراست استفاده گردید. این فیکسچر بر پایه مطالعه (لی و همکاران، ۲۰۲۰) که جزئیات مرتبط با آن در فصل قبل ذکر گردیده است، ساخته شد. تصویر فیکسچر ساخته شده در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است.

به منظور اندازه‌گیری حداکثر نیروی برشی قابل تحمل توسط سطح مشترک زوج نمونه‌های آسفالتی، پس از قرارگیری نمونه‌ها درون فیکسچر ساخته شده شکل (۳-۱۵)، بارگذاری توسط بازوی خمشی دستگاه UTM منطبق بر (لی و همکاران، ۲۰۲۰) با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد. این آزمون‌ها در دمای محیط و در حدود 25 ± 4 درجه سانتیگراد انجام پذیرفت. از رایانه متصل به دستگاه نیز به منظور جمع‌آوری داده‌های آزمایش استفاده شد. نیرو (مقاومت) در حین آزمون توسط نیروسنج^۲ نصب

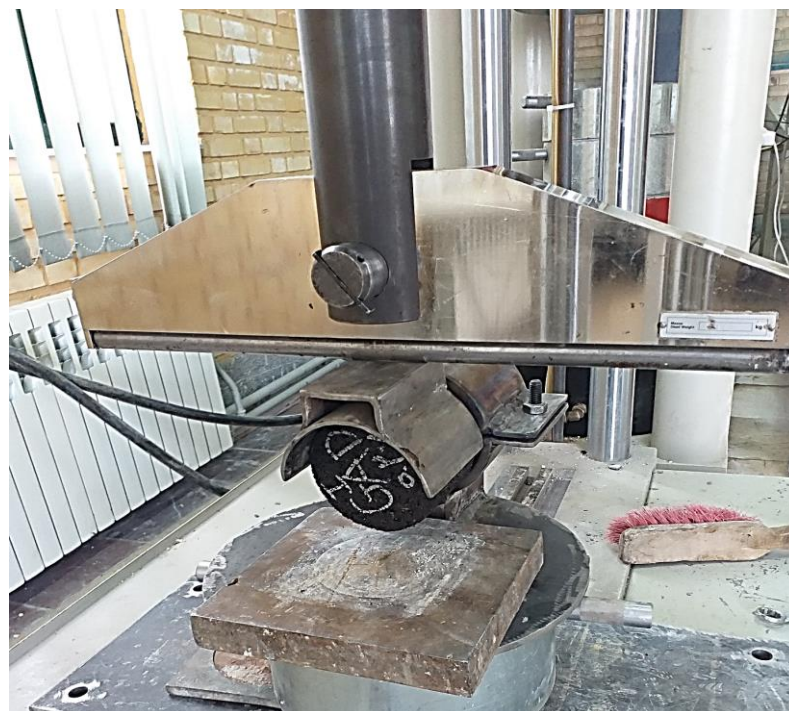
^۱ Zwick/Roell

^۲ Load Cell

شده بر روی دستگاه تعیین شد. شکل (۳-۱۶) تصویر یک نمونه را پس از اعمال نیرو و شکست آن نشان می‌دهد. در جدول (۳-۹) تعداد آزمون‌های انجام پذیرفته و متغیرهای آنها به صورت خلاصه آورده شده است.



شکل ۳-۱۴: فیکسچر ساخته شده جهت آزمون برش مستقیم



شکل ۳-۱۵: نحوه اعمال نیرو بر روی مرز مشترک زوج نمونه‌های آسفالتی



شکل ۳-۱۶: زوج نمونه آسفالتی پس از برش خوردگی

جدول ۳-۹: متغیرها و تعداد نمونه‌های ساخته شده

تعداد کل نمونه‌ها	تعداد تکرار	متغیرهای مورد بررسی			نوع آزمایش
		نوع شرایط رطوبتی	میزان افزودنی ضد عریان‌شدگی	نوع ژئوسنتتیک	
۹۶	۲	خشک (بدون اعمال کاندیشن)	بدون افزودنی	بدون ژئوسنتتیک	برش مستقیم
		ذوب و یخ	۰/۲ درصد وزن قیر	ژئوتکستایل	
			۰/۳ درصد وزن قیر	ژئوگرید	
		غرقابی	۰/۴ درصد وزن قیر	توری مشبک	

۳-۶ آزمایش پخش ماسه^۱

همان‌گونه که در فصل گذشته به آن اشاره شد، یکی از عوامل اصلی دخیل در مقاومت برشی بین دو لایه روسازی، بافت سطوح لایه‌های آسفالتی قرار گرفته بر روی یکدیگر می‌باشد. با توجه به این موضوع، به جهت کنترل عمق بافت سطح نمونه‌های آسفالتی از آزمون پخش ماسه استفاده شده است. بدین منظور ۱/۵ سانتیمتر مکعب ماسه سیلیسی با بزرگی ذرات ۷۵ تا ۳۰۰ میکرومتر (میکرون) بر روی سطح نمونه‌های استوانه‌ای به طور یکنواخت پخش شد. توزیع ماسه بر روی سطح نمونه‌ها به گونه‌ای بود که ضمن تشکیل دایره‌ای تقریبی بر روی سطح استوانه آسفالتی، از پوشش خلل و فرج سطح نمونه‌ها به گونه‌ای یکسان و متوازن اطمینان حاصل شود. این کار برای نمونه‌های آسفالتی پیش از اعمال اندود سطحی و در هر یک از حالات قبل و بعد از اعمال شرایط یخبندان AASHTO T283 بدون مرحله ذوب، اعمال شرایط رطوبتی AASHTO T283 (ذوب و یخ) به طور کامل و اعمال شرایط رطوبتی پیشنهادی (غرقابی)، انجام گرفت. ضمناً برای هر یک از شرایط نام برده شده، سه نمونه به طور مجزا مورد آزمایش قرار گرفته و برای هر نمونه چهار قرائت متمایز از قطر تقریبی دایره ایجاد شده در جهات مختلف صورت پذیرفت. شکل (۳-۱۷) تصاویر نمونه‌های مورد آزمون پس از توزیع ماسه بر روی سطح را نشان می‌دهند. همچنین رابطه‌های مورد استفاده قرار گرفته شده جهت محاسبه متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده جهات، متوسط عمق بافت، انحراف معیار و ضریب تغییرات، به ترتیب در روابط (۳-۷) تا (۳-۱۰) آورده شده‌اند.

$$D_{mean} = \frac{\sum d_i}{N}$$

رابطه (۳-۷)

^۱ Sand patch test

در رابطه فوق، D_{mean} : متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده جهات بر حسب سانتیمتر، d_i : قطر تقریبی دایره ایجاد شده در جهات مختلف بر حسب سانتیمتر و N : تعداد قطر اندازه‌گیری شده نمونه‌ها می‌باشد.



الف) نمونه‌های مورد آزمون پس از توزیع ماسه بر روی سطح



ب) قرائت قطر تقریبی دایره ایجاد شده بر روی نمونه
شکل ۳-۱۷: نحوه انجام آزمایش پخش ماسه

$$H_{mean} = \frac{4V}{\pi D_{mean}^2} \quad \text{رابطه (۸-۳)}$$

که در رابطه فوق، H_{mean} : متوسط عمق بافت بر حسب سانتیمتر، D_{mean} : متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده جهات بر حسب سانتیمتر و V : حجم ماسه سیلیسی (۱/۵ سانتیمتر مکعب) می‌باشد.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (H_{mean\ i} - M_H)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۹-۳)}$$

که در این رابطه σ : انحراف از معیار بر حسب سانتیمتر، N : تعداد نمونه‌ها، M_H : میانگین متوسط عمق بافت هر کاندیشن بر حسب سانتیمتر و $H_{mean\ i}$: متوسط عمق بافت هر نمونه بر حسب سانتیمتر می‌باشد.

$$CV = \frac{\sigma}{M_H} \times 100 \quad \text{رابطه (۱۰-۳)}$$

که در رابطه فوق CV : ضریب تغییرات، و همانطور که در روابط قبلی بیان شد σ : انحراف از معیار بر حسب سانتیمتر و M_H : میانگین متوسط عمق بافت هر کاندیشن بر حسب سانتیمتر می‌باشد.

فصل چہارم: تحلیل و تفسیر نتائج

۴-۱ مقدمه

در این فصل نتایج فعالیت‌های آزمایشگاهی به طور جزء به جزء مورد بررسی قرار گرفته و خروجی‌های بدست آمده تحلیل گردیده‌اند.

۴-۲ آزمون پخش ماسه

همانطور که در فصل قبل اشاره شد، این آزمون برای نمونه‌های استوانه‌ای (مارشال) و در قبل و بعد از اعمال شرایط رطوبتی، در سه حالت: الف) با اعمال شرایط یخبندان مطابق پیشنهاد استاندارد AASHTO T283 اما بدون سیکل ذوب، ب) با اعمال شرایط پیشنهاد شده در AASHTO T283 به طور کامل و ج) با اعمال شرایط غرقابی مطابق کاندیشن پیشنهادی در مطالعه حاضر، انجام پذیرفت. جهت اطمینان از نتایج حاصل شده برای هر گروه، سه بار تکرار در نظر گرفته شد. مقادیر متوسط عمق بافت سطحی محاسبه شده برای همه نمونه‌ها، در جداول (۴-۱) تا (۴-۳) ذکر گردیده‌اند. در این جداول، d_1 تا d_4 ، چهار اندازه‌گیری متمایز در راستاهای متفاوت از قطر دایره حاصل از پخش ماسه بر روی یک نمونه را نشان می‌دهند.

جدول ۴-۱: نتایج نمونه‌های یخبندان (بدون مرحله ذوب)

شرایط نمونه	نام نمونه	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)	d_4 (cm)	متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده جهت (D _{mean})	متوسط عمق بافت (H _{mean})	میانگین (M _H)	انحراف معیار (σ)	ضریب تغییرات (CV)
قبل از اعمال شرایط	F ₁	۸/۴	۸/۷	۹	۹/۲	۸/۸۲۵	۰/۰۲۴۵	۰/۰۲۳۴	۰/۰۰۱۵	۶/۳۸۲
	F ₂	۸/۹	۸/۹	۸/۹	۹	۸/۹۲۵	۰/۰۲۴۰			
	F ₃	۹/۳	۹/۴	۹/۳	۹/۵	۹/۳۷۵	۰/۰۲۱۷			
پس از اعمال شرایط	F ₁ '	۹/۳	۹/۳	۹/۱۵	۹/۲۵	۹/۲۵۰	۰/۰۲۲۳	۰/۰۲۲۳	۰/۰۰۱۱	۴/۷۱۷۴
	F ₂ '	۸/۹۵	۹/۱۵	۸/۹	۹/۲	۹/۰۵۰	۰/۰۲۳۳			
	F ₃ '	۹/۴	۹/۶	۹/۵	۹/۵	۹/۵۰۰	۰/۰۲۱۲			

جدول ۴-۲: نتایج نمونه‌های ذوب و یخ (AASHTO T283)

شرایط نمونه	نام نمونه	d ₁ (cm)	d ₂ (cm)	d ₃ (cm)	d ₄ (cm)	متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده جهات (D _{mean})	متوسط عمق بافت (H _{mean})	میانگین (M _H)	انحراف معیار (σ)	ضریب تغییرات (CV)
قبل از اعمال شرایط	T1	۹	۸/۹	۸/۵	۸/۸	۸/۸۰۰	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۰۹	۳/۸۲۳۲
	T2	۹/۱	۹/۳	۹/۱	۹	۹/۱۲۵	۰/۰۲۲۹			
	T3	۸/۹	۹/۴	۸/۶	۹/۱	۹/۰۰۰	۰/۰۲۳۶			
پس از اعمال شرایط	T1'	۹/۲	۹/۲	۹/۲	۹/۵	۹/۲۷۵	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۰۰۳	۱/۳۵۱۴
	T2'	۹/۲	۹/۴	۹/۲	۹/۱	۹/۲۲۵	۰/۰۲۲۵			
	T3'	۹/۴	۹/۱	۹/۵	۹/۴	۹/۳۵۰	۰/۰۲۱۹			

جدول ۴-۳: نتایج نمونه‌های غرقابی (کاندیشن پیشنهادی)

شرایط نمونه	نام نمونه	d ₁ (cm)	d ₂ (cm)	d ₃ (cm)	d ₄ (cm)	متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده جهات (D _{mean})	متوسط عمق بافت (H _{mean})	میانگین (M _H)	انحراف معیار (σ)	ضریب تغییرات (CV)
قبل از اعمال شرایط	P1	۹/۲۵	۸/۸	۹/۲	۹	۹/۰۶۳	۰/۰۲۳۳	۰/۰۲۳۱	۰/۰۰۰۳	۱/۲۴۷۹
	P2	۹/۲	۹	۹	۹	۹/۰۵۰	۰/۰۲۳۳			
	P3	۹/۱	۹/۳	۹/۳	۸/۹	۹/۱۵۰	۰/۰۲۲۸			
پس از اعمال شرایط	P1'	۹/۵	۹/۴	۹	۹/۴	۹/۳۲۵	۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۱۷	۰/۰۰۰۴	۱/۷۴۲
	P2'	۹/۵	۹/۳	۹/۶	۹	۹/۳۵۰	۰/۰۲۱۹			
	P3'	۹/۴	۹/۸	۹/۳	۹/۴	۹/۴۷۵	۰/۰۲۱۳			

همان‌گونه که در جداول (۴-۱) تا (۴-۳) قابل ملاحظه است، تفاوت محسوسی بین مقادیر متوسط عمق بافت نمونه‌ها، قبل و بعد از اعمال شرایط رطوبتی، در هیچ یک از حالات مشاهده نمی‌گردد. نظر به شیوه ساخت و اتصال بکار گرفته شده برای زوج نمونه‌های آسفالتی، این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات احتمالی نیروی برش حداکثر بین دو نمونه مخلوط آسفالتی، ناشی از اعمال شرایط رطوبتی،

به دلیل تغییرات حادث شده در بافت سطحی نیستند. یافته حاضر کمک می‌نماید تا در ادامه بتوان دلایل بروز تغییرات احتمالی مقاومت برشی اتصال نمونه‌های آسفالتی را به شکل دقیق‌تری شناسایی و ارزیابی نمود.

علاوه بر این مشاهده می‌گردد که مقادیر ضرایب تغییرات محاسبه شده برای همه گروه‌ها کمتر از ۷ درصد بوده، که حکایت از دقت مناسب روش و اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته دارد. نزدیکی مقادیر بافت سطحی برای همه نمونه‌ها، فارغ از کاندشین اعمالی، نیز می‌تواند گواهی بر تلاش‌های صورت پذیرفته در راستای هرچه یکسان بودن سطح مقطع نمونه‌های آسفالتی باشد.

۴-۳ ارزیابی امکان بکارگیری شرایط رطوبتی AASHTO T283

همان‌گونه که در فصول گذشته به آن پرداخته شد، در حال حاضر استاندارد فراگیری جهت ارزیابی تأثیرات رطوبت بر روی مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی در دسترس نیست. این موضوع به آن معنی می‌باشد که علاوه بر فقدان اطلاعات لازم در مورد تأثیرات حضور آب بر اتصال بین لایه‌های روسازی، شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر اندرکنش بین لایه‌های روسازی در آزمایشگاه نیز نیازمند تحقیق و بررسی است. به این منظور در پژوهش حاضر، شرایط رطوبتی پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 - به عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین استانداردهای حوزه راهسازی جهت ارزیابی تأثیرات رطوبت بر مقاومت کلی مخلوط‌های آسفالتی - مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه استاندارد فوق‌الذکر با هدف پیش‌بینی حساسیت درازمدت عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم تهیه و تدوین گردیده است، اما در فقدان استاندارد کاملاً مرتبط با اهداف مطالعه حاضر، یکی از اصلی‌ترین گزینه‌های مورد رجوع تلقی می‌گردد.

به منظور ارزیابی امکان بکارگیری شرایط رطوبتی پیشنهاد شده در استاندارد AASHTO T283 جهت شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر اندرکنش بین لایه‌های آسفالتی، ۳۲ زوج نمونه آسفالتی مختلف که مطابق روش بیان گردیده در فصل سوم تهیه گردیده بودند، تحت شرایط رطوبتی فوق‌الذکر

قرار گرفته و سپس از طریق آزمون برش مستقیم مورد ارزیابی واقع شدند. مشخصات نمونه‌های ارزیابی شده در جدول (۴-۴) بیان گردیده است.

جدول ۴-۴: متغیرها و مشخصات نمونه‌های ذوب و یخ (AASHTO T283)

نوع ژئوسنتتیک	میزان افزودنی ضد عریان شدگی	نوع شرایط رطوبتی	تعداد تکرار	تعداد نمونه‌ها
بدون ژئوسنتتیک	۰ (بدون افزودنی)	ذوب و یخ (AASHTO T 283)	۲	۳۲
ژئوتکستایل	۰/۲ درصد وزن قیر			
ژئوگرید	۰/۳ درصد وزن قیر			
توری مشبک	۰/۴ درصد وزن قیر			

نتایج نشان داد که در کلیه موارد ارزیابی و برای تمام زوج نمونه‌های مورد سنجش قرار گرفته، مقاومت برشی بین دو نمونه استوانه‌ای با افزایش همراه بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که فرآیند پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 جهت شبیه‌سازی اثرات دراز مدت رطوبت، نمی‌تواند برای تأثیرگذاری بر اندرکنش بین لایه‌های آسفالتی بکار گرفته شود. برخی دلایل این موضوع را می‌توان در فاز ذوب یخ شبیه‌سازی پیشنهاد شده جست‌وجو نمود. بر اساس توضیحات استاندارد (آشتو تی ۲۸۳، ۲۰۰۲) در این رابطه باید زوج نمونه‌های خارج شده از فریزر به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گیرند. اگرچه این فاز ممکن است در ترکیب با مراحل قبل از خود (اشباع‌سازی و یخبندان)، سبب جدایش‌هایی بین دو نمونه آسفالتی مورد کاندیشن گردد، اما به دلیل در نظرگیری اثرات وزن سربار لایه فوقانی و نیز تأثیرات احتمالی وزن ترافیک عبوری، نمی‌تواند اثری ماندگار ایجاد نماید.

از سویی دیگر، اعمال گرمایش ۶۰ درجه سانتیگرادی به مدت ۲۴ ساعت سبب دو اثر ثانویه نیز می‌گردد. نخست آنکه، علی‌رغم تلاش‌های صورت پذیرفته به منظور پخش هرچه یکنواخت قیر اندود

سطحی در هنگام ساخت زوج نمونه‌های آسفالتی مورد مطالعه، به دلیل استفاده از قیر خالص به عنوان اندود سطحی، توزیع کاملاً یکنواختی از قیر در بین نمونه‌های آسفالتی مورد اتصال ایجاد نگردیده است. اما، پس از قرار گیری زوج نمونه در درون حمام این فرصت فراهم گردیده تا به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک قیر و در اختیار قرار گرفتن دما و زمان مناسب، توزیعی یکنواخت‌تر از قیر بوجود آید. نتیجتاً بهبود توزیع قیر در سطح مشترک اتصال دو نمونه، زمینه‌ساز افزایش مقاومت برشی آن گردیده است. اثر ثانویه دیگر را می‌توان نوعی اعمال شبیه‌سازی پیرشدگی اولیه برای قیر اندود سطحی در نظر گرفت. گرمای ۶۰ درجه سانتیگرادی به مدت ۲۴ ساعت، سبب افزایش سختی قیر، هرچند به میزان ناچیز شده و بر روی مشخصات رئولوژیک قیر از قبیل کندروانی و... تأثیر گذاشته است. بنابراین، افزایش مقاومت برشی بین نمونه‌های آسفالتی می‌تواند از افزایش سختی اندود سطحی آنها نیز ناشی گردیده باشد.

نکته دیگری را که می‌توان به مجموعه دلایل عدم موفقیت شرایط رطوبتی پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 برای شبیه‌سازی اثرات دراز مدت رطوبت بر روی اندود سطحی اضافه نمود، عدم لحاظ نمودن تعداد سیکل‌های تخریبی کافی است. شرایط پیشنهادی در AASHTO T283 به نوعی در نظر گرفته شده‌اند که با تنها یکبار اعمال چرخه ذوب و انجماد بتوان به اثرات مخربی معادل تخریب دراز مدت چندین سال حضور رطوبت در درون مخلوط آسفالتی دست یافت. با این وجود، به دلیل ضخامت بیشتر قیر اندود سطحی در قیاس با فیلم نازک پوشاننده مصالح‌سنگی سازنده مخلوط آسفالتی، هیچ تضمینی وجود ندارد که چرخه فوق‌الذکر بتواند تنها با یکبار اعمال، اثرات مشابهی را نیز برای اندود سطحی ایجاد نماید.

ممکن است بتوان به مجموعه دلایل فوق‌الذکر برای عدم تناسب شرایط پیشنهادی در AASHTO T283 با اهداف مطالعه حاضر عواملی دیگر را افزود و یا برخی از آنها را حذف نموده یا نادیده گرفت، اما این موضوع قطعاً نیازمند بررسی‌های بیشتری در آینده بوده که با توجه به محدودیت‌های تحقیق

حاضر از آن صرف نظر شده است. از آنجا که بررسی منابع پیشین نتوانست روشی متناسب را برای شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر اندکنش بین لایه‌های روسازی آسفالتی در دسترس قرار دهد، در ادامه مطالعه حاضر با الگوبرداری از کلیت شرایط رطوبتی پیشنهادی در مطالعات پیشین برای مخلوط‌های آسفالتی (ای اس تی ام دی ۱۵۵۹^۱، ۱۹۸۹ و ریکاسنس و همکاران، ۲۰۰۵ و آپیگی و همکاران، ۲۰۱۴ و سنگول و همکاران، ۲۰۱۲)، سعی گردید تا از روشی جایگزین استفاده گردد.

۴-۴ آزمون برش مستقیم

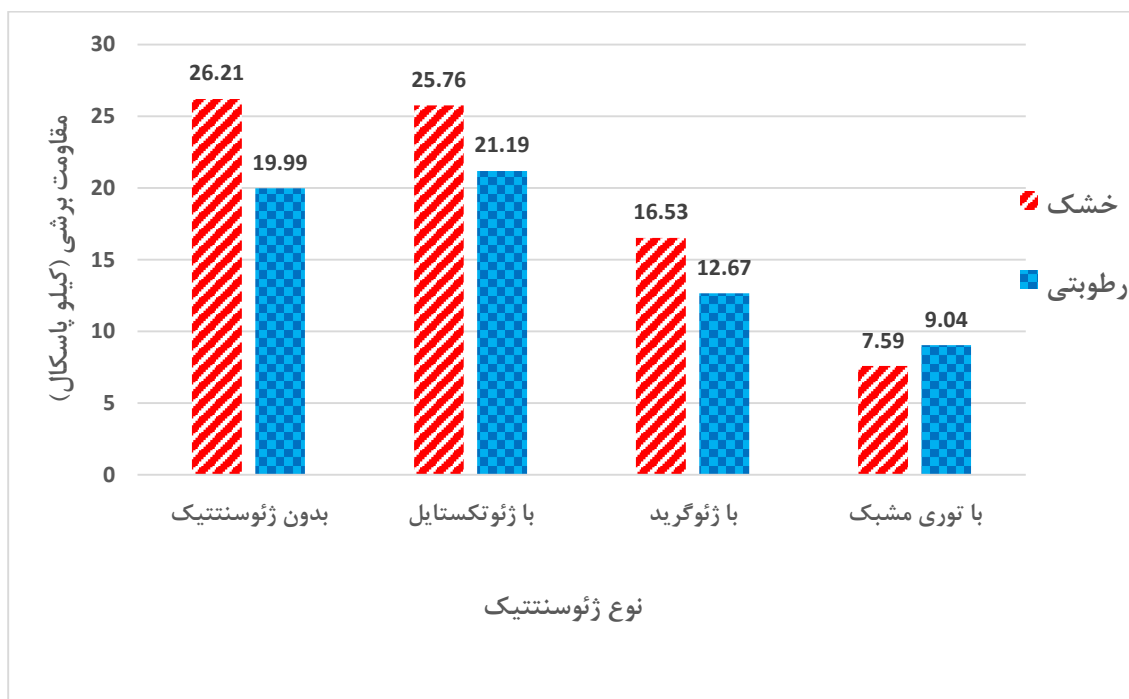
پس از ساخت زوج نمونه‌های آسفالتی مطابق روش و مشخصات ذکر گردیده در فصل گذشته، نمونه‌ها مطابق روش پیشنهادی مطالعه حاضر تحت شرایط رطوبتی واقع گردیدند. همان‌گونه در بخش قبلی به آن پرداخته شد، به دلیل محدودیت‌های پروژه، از ارزیابی مجدد روش کاندیشن پیشنهادی صرف‌نظر گردیده و با اتکا به نتایج اولیه حاصل شده، کلیه آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های آماده شده با این روش انجام پذیرفتند. در ادامه نتایج حاصل شده به تفکیک مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۴-۱ تأثیر ژئوسنتتیک‌ها بر دوام اتصال لایه‌های آسفالتی در برابر

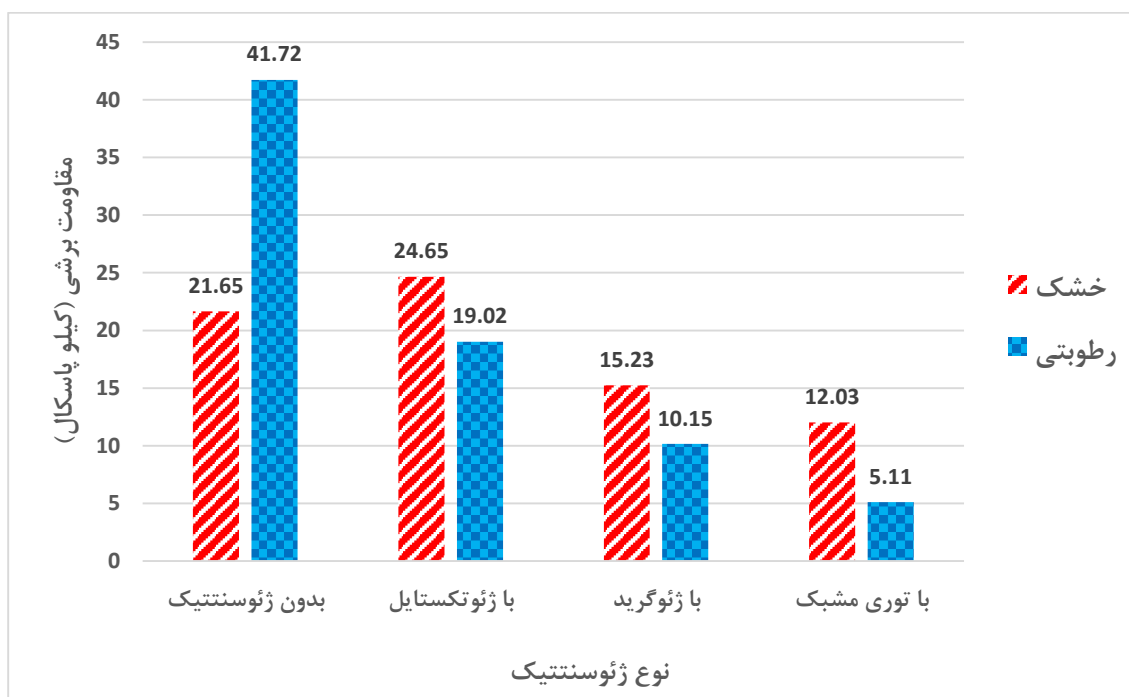
شرایط رطوبتی

تأثیر رطوبت بر مقاومت برشی بین دو نمونه آسفالتی، بر پایه نوع ژئوسنتتیک مورد استفاده و برای درصد‌های مختلف افزودنی بکارگرفته شده در اندود سطحی، در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴) نشان داده شده است.

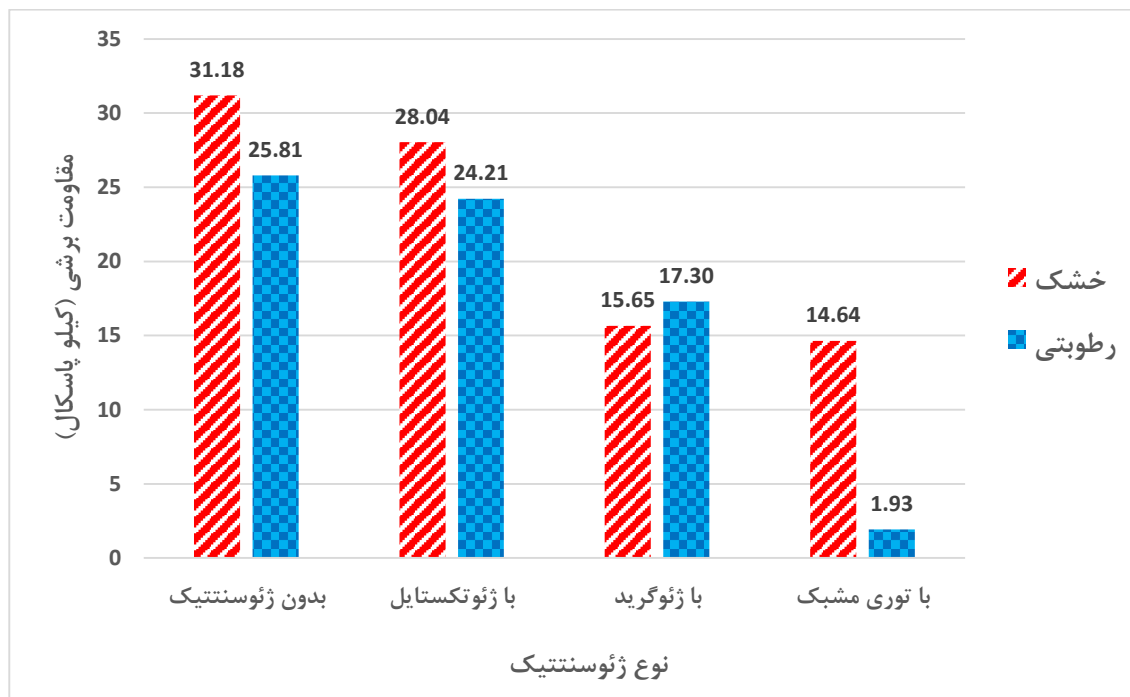
¹ ASTM D 1559



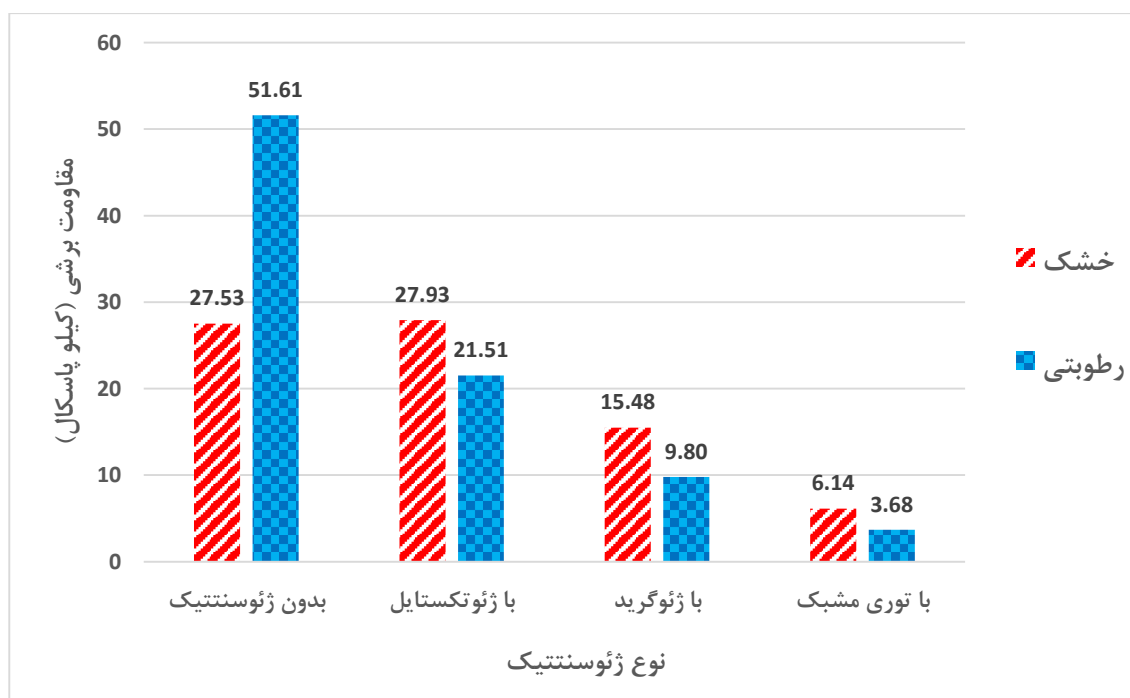
شکل ۴-۱: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی اصلاح نشده



شکل ۴-۲: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی حاوی ۰/۲ درصد افزودنی



شکل ۳-۴: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی حاوی ۳/۰ درصد افزودنی



شکل ۴-۴: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اعمال شرایط رطوبتی بر پایه نوع ژئوسنتتیک استفاده گردیده در بین نمونه‌های آسفالتی متصل شده با اندود سطحی حاوی ۴/۰ درصد افزودنی

همانطور که در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴) مشاهده می‌شود، در اغلب موارد شرایط رطوبتی اعمال گردیده بر اتصال بین لایه‌ها و اندود سطحی تأثیرگذار بوده و سبب کاهش مقاومت برشی نسبت به حالت خشک گردیده است. میزان تأثیرپذیری اتصال نمونه‌های دارای اندودهای فاقد افزودنی از شرایط رطوبتی، برای نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک، دارای ژئوتکستایل و دارای ژئوگرید به ترتیب ۲۳/۷۳، ۱۷/۷۴ و ۲۳/۳۵ درصد بوده است. با این وجود، نتایج فوق‌الذکر برای نمونه‌های دارای اندود اصلاح شده قابل تعمیم نبوده و بررسی‌های دقیق‌تر آشکار می‌نماید که استفاده از ژئوسنتتیک‌های مختلف اثرات تقریباً مشابهی بر روی مقاومت برشی نمونه‌ها داشته است. به دیگر بیان، ارزیابی کلی از تمام نتایج نشان می‌دهد که تغییر در نوع ژئوسنتتیک بکار گرفته شده بر حساسیت رطوبتی اتصال نمونه‌ها تأثیرگذار نبوده است. دلیل احتمالی این موضوع را می‌توان در مکانیزم آسیب رطوبتی اندودهای سطحی جست‌وجو نمود. حضور درازمدت رطوبت، نه خود اندود سطحی و نه حتی ژئوسنتتیک متصل به آن را متأثر می‌سازد، بلکه پیوند و اتصال میان اندود سطحی با ژئوسنتتیک یا مخلوط آسفالتی را دچار تخریب و گسست می‌نماید. از این رو با توجه به کیفیت مشابه اتصال میان اندود سطحی با ژئوسنتتیک‌ها و اجزای مخلوط آسفالتی در زوج نمونه‌های دارای اندود سطحی مشابه (دارای اندود سطحی با مقادیر یکسانی از افزودنی)، اثرات مشابهی از تأثیرگذاری رطوبت بر روی آنها مشاهده گردیده است.

علاوه بر موارد مذکور، بررسی شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴) آشکار می‌نماید که مقاومت برشی مطلق —فارغ از شرایط رطوبتی اعمال شده— در بین زوج نمونه‌های فاقد ژئوسنتتیک و دارای ژئوتکستایل با اندود سطحی یکسان، تقریباً مشابه و بیش از زوج نمونه‌های دارای ژئوگرید و با توری مشبک بوده است. همچنین مشاهده می‌گردد که عملکرد زوج نمونه‌های حاوی ژئوگرید به میزان اندکی بهتر از زوج نمونه‌های دارای توری مشبک بوده است. یکی از دلایل احتمالی این مشاهدات نحوه توزیع اندود سطحی در سطح مشترک بین دو نمونه آسفالتی بوده است. در زوج نمونه‌های دارای ژئوتکستایل و یا فاقد

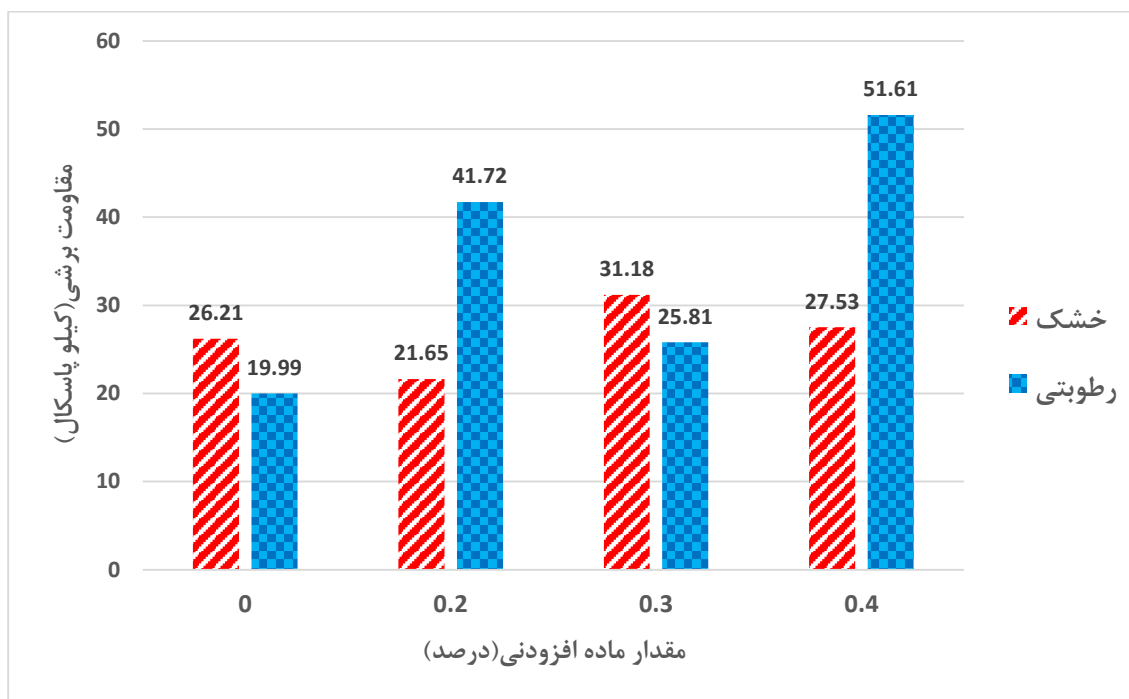
ژئوسنتتیک به دلیل یکنواخت‌تر بودن نحوه توزیع قیر اندود، عملکرد مناسب‌تری از آن مشاهده گردیده است.

دلیل مهم بعدی را باید در مکانیزم اتصال بین ژئوسنتتیک با مخلوط آسفالتی جست‌جو نمود. در زوج نمونه‌های دارای ژئوتکستایل تنها چسبندگی ناشی از اندود سطحی پل ارتباطی انتقال تنش‌ها محسوب شده که تمام سطح تماسی آن را می‌پوشاند، اما در ژئوگرید و توری مشبک تلفیقی از چسبندگی قیر اندود با اصطکاک فیزیکی مشاهده می‌گردد که سهم اصطکاک و درگیری فیزیکی در ژئوگرید کمتر و در توری مشبک بیشتر است. از آنجا که محل بکارگیری ژئوگرید و توری مشبک در این مطالعه نه درون مخلوط آسفالتی، بلکه بین دو لایه آسفالتی بوده، تقریباً عملکرد اصطکاکی آنها حذف گردیده است و نتیجتاً آنچه در آزمون‌های برش مستقیم مقاومت را سبب گردیده، همان سهم چسبندگی اندود سطحی بوده است. بنابراین بهترین عملکرد در زوج نمونه‌های حاوی ژئوتکستایل مشاهده شده و متناسب با جذب و توزیع بهتر اندود، مقاومت بیشتری در زوج نمونه‌های دارای ژئوگرید نسبت به زوج نمونه‌های حاوی توری مشبک مشاهده شده است.

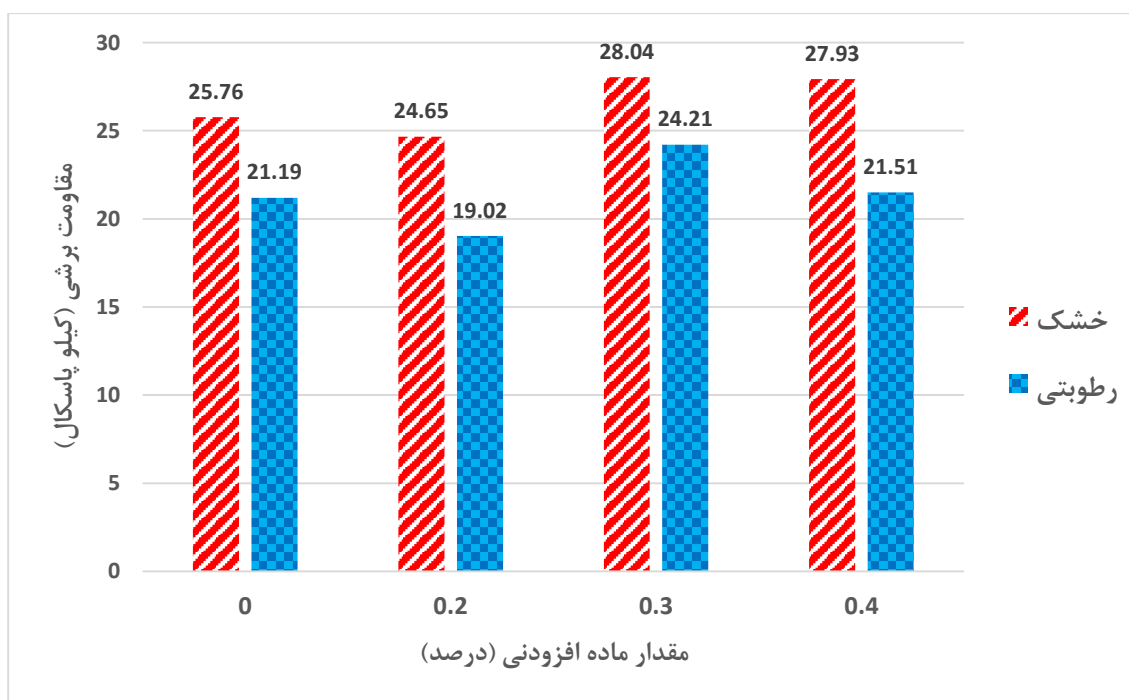
۴-۴-۲ تاثیر افزودنی ضدعریان‌شدگی بر دوام اتصال لایه‌های آسفالتی

در برابر شرایط رطوبتی

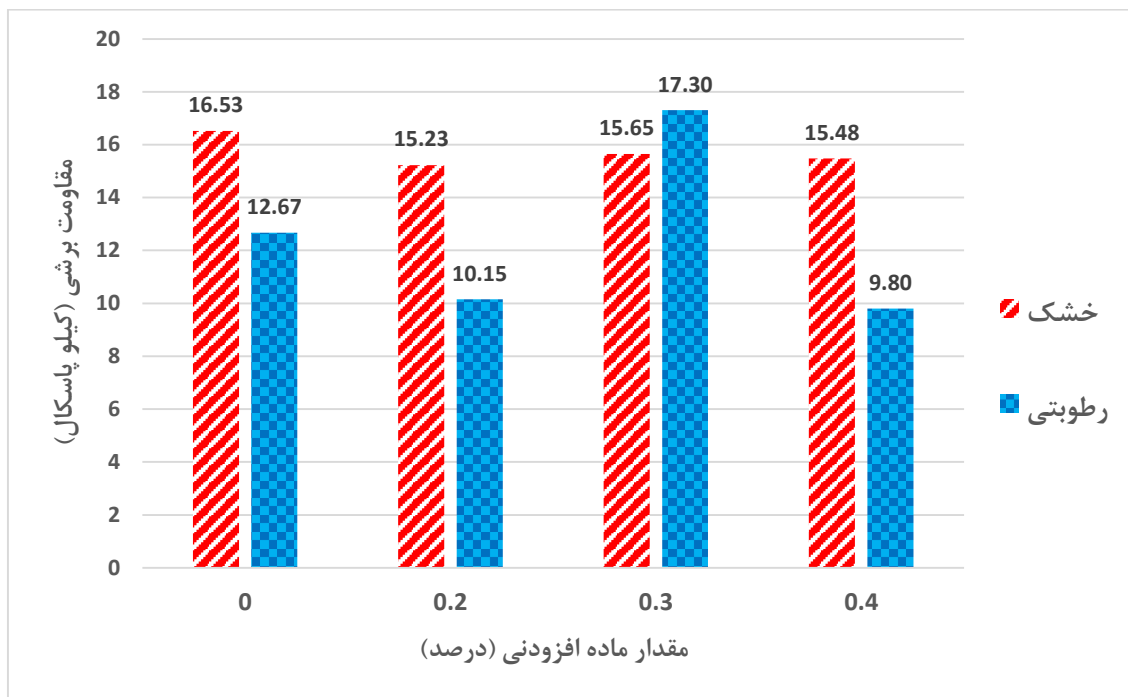
تأثیر اصلاح اندود سطحی بر دوام اتصال دو نمونه آسفالتی، بر پایه میزان افزودنی بکار گرفته شده و برای ژئوسنتتیک‌های مختلف، در شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۸) نشان داده شده است.



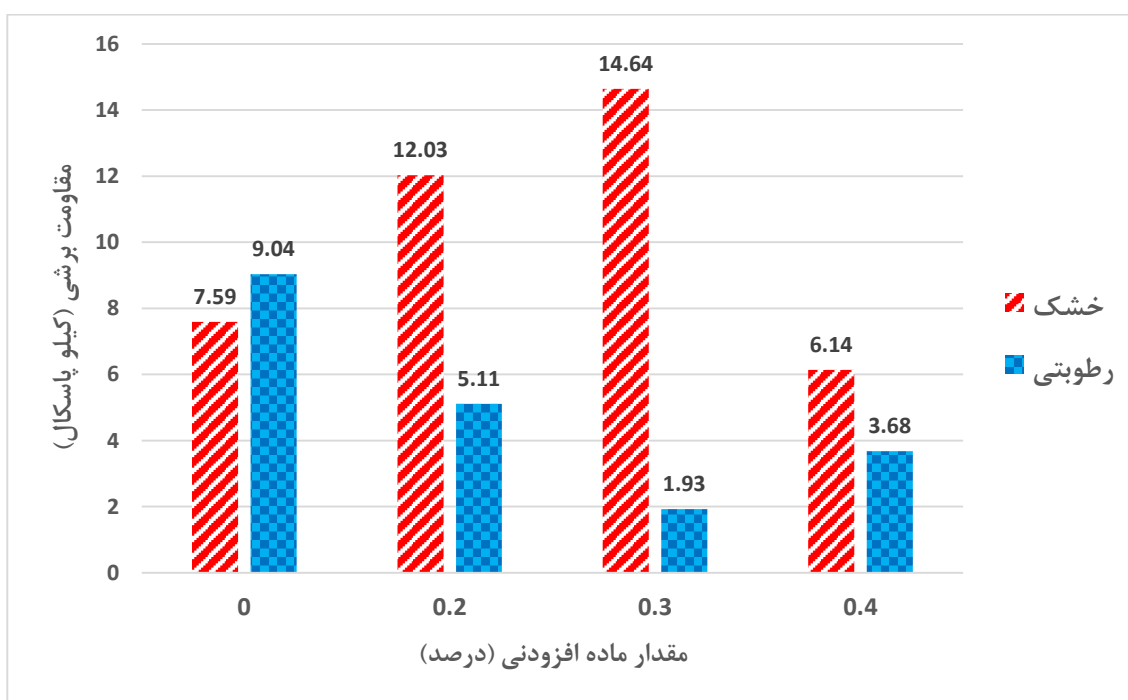
شکل ۴-۵: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک



شکل ۴-۶: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های دارای ژئوتکستایل



شکل ۴-۷: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های دارای ژئوگرید



شکل ۴-۸: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از اصلاح اندود سطحی با بکارگیری مقادیر مختلف افزودنی برای زوج نمونه‌های دارای توری مشبک

بررسی شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۸) نشان می‌دهد که اصلاح قیر اندود سطحی بوسیله افزودنی ضد عریان‌شدگی نه تنها نتوانسته است حساسیت رطوبتی اتصال آن را با ژئوسنتتیک‌ها و مخلوط آسفالتی کاهش دهد، بلکه مقاومت برشی مطلق زوج نمونه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار نداده است. اگرچه این افزودنی تجاری به طور تخصصی جهت بهبود اتصال میان قیر و مصالح سنگی تهیه گردیده، اما حسب ارزیابی‌های اولیه آزمایشگاهی این انتظار وجود داشت تا در جهت تقویت اتصال میان اندود سطحی با ژئوسنتتیک‌ها و مخلوط آسفالتی نیز مفید واقع گردد. علت اصلی برآورده نگردیدن انتظارات اولیه را احتمالاً بایستی در تغییرات خصوصیات رئولوژیک قیر اندود، ناشی از اصلاح بوسیله افزودنی جست‌وجو نمود. این احتمال وجود دارد که علی‌رغم بهبود اتصال و پیوستگی میان اندود سطحی با ژئوسنتتیک‌ها و مخلوط آسفالتی به دلیل بکارگیری افزودنی، به طور همزمان کندروانی قیر نیز کاهش یافته تا بتواند پوشش بهتری را ایجاد نماید. نتیجتاً کاهش کندروانی سبب کاهش خصوصیات باربری قیر گردیده که در نهایت سبب خنثی گردیدن تأثیر بهبود حاصل از تقویت اتصال شده است.

از دیگر نکات قابل‌مستفاد شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۸) می‌توان به کاهش پراکندگی نتایج در داده‌های مرتبط با زوج نمونه‌های دارای ژئوتکستایل نسبت به دیگر زوج نمونه‌ها اشاره نمود. همان‌گونه که پیشتر نیز به آن پرداخته شد، یکی از عوامل بسیار مهم در حُسن عملکرد اندودهای سطحی، پخش یکنواخت آنها بر سطوح مورد اتصال است. این موضوع به حدی حائز اهمیت است که احتمالاً یکی از دلایل کاهش اقبال نسبت به استفاده از قیرهای خالص به عنوان اندودهای سطحی نیز سختی و پیچیدگی کنترل پخش آنها در محل ساخت روسازی بوده، به نحوی که حتی در نسخه حال حاضر نشریه ۲۳۴ (نشریه شماره ۲۳۴، ۱۳۹۰) اشاره مستقیمی به این نوع اندودها صورت نگرفته است. با این وجود، حسب اهداف از پیش تعیین شده برای پژوهش حاضر، سعی گردید تا ارزیابی از عملکرد این نوع اندودهای سطحی به دست آید. تحلیل نتایج آزمایشات چنین نشان داد که یکی از راه‌های غلبه بر توزیع غیریکنواخت

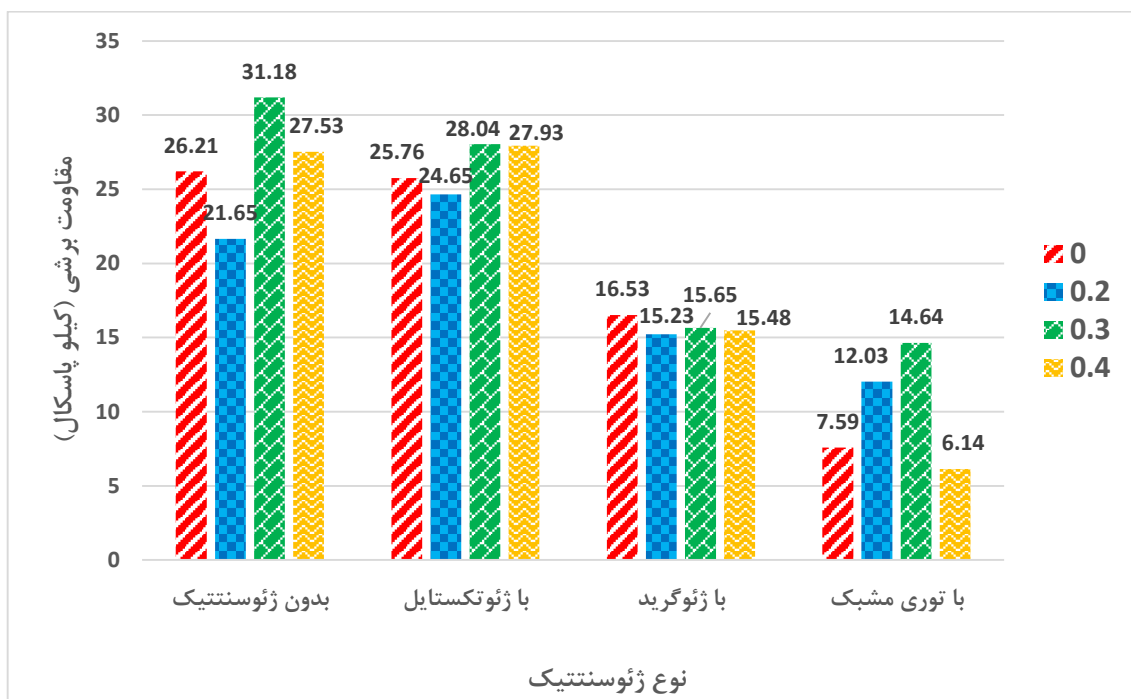
اندوذهای قیر خالص و کاهش عوارض ناشی از آنها، بکارگیری ژئوتکستایل‌ها در سطح مشترک لایه‌های آسفالتی مورد اتصال است.

۴-۴-۳ جمع‌بندی

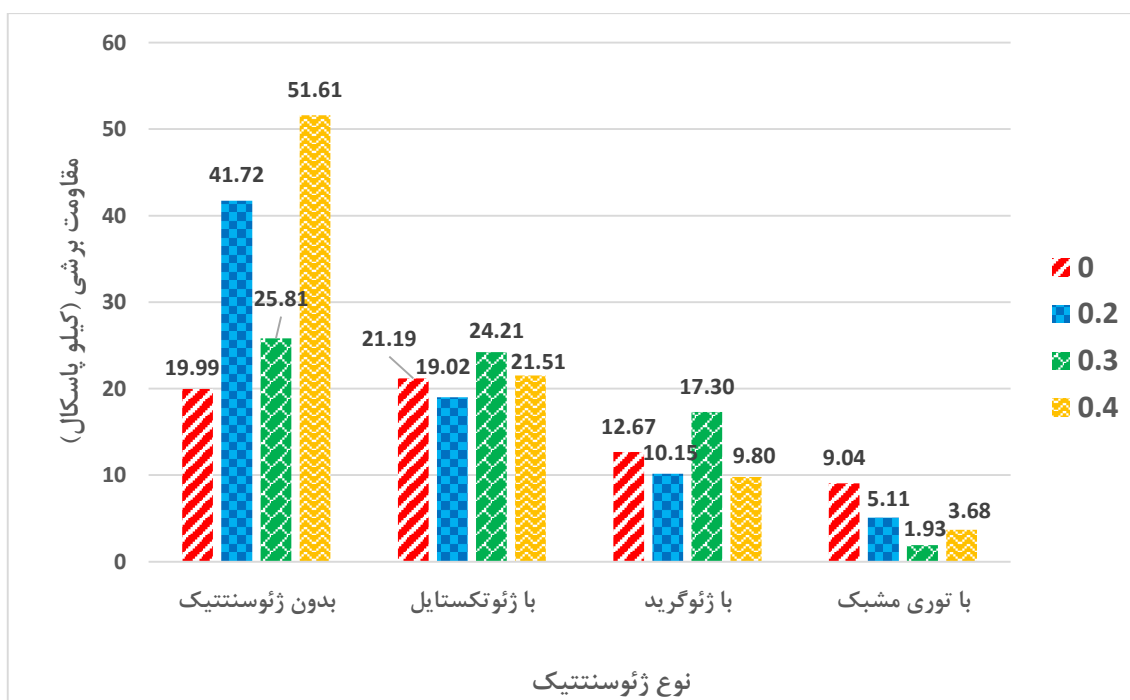
تغییرات مقاومت برشی زوج نمونه‌های آسفالتی، بر پایه نوع ژئوسنتتیک مورد استفاده و برای درصد‌های مختلف افزودنی بکارگرفته شده در اندود سطحی، قبل و پس از اعمال شرایط رطوبتی به ترتیب در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) نشان داده شده است.

تحلیل نتایج شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) در تأیید یافته‌های قسمت‌های قبل نشان می‌دهد که مقاومت برشی مطلق در زوج نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک و دارای ژئوتکستایل تقریباً مشابه بوده و بیش از مقاومت برشی زوج نمونه‌های دارای ژئوگرید و حاوی توری مشبک است. بررسی‌های دقیق‌تر نیز نشان می‌دهد که متوسط عملکرد برشی زوج نمونه‌های حاوی ژئوگرید کمی بهتر از زوج نمونه‌های دارای توری مشبک بوده است. کاهش مقاومت برشی بین لایه‌های آسفالتی ناشی از بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها، پیش از این در مطالعات مشابهی (زیلنسکی، ۲۰۱۱ و ویتکوس و همکاران، ۲۰۱۱ و کومار و همکاران، ۲۰۱۷ و سودارسانان و همکاران، ۲۰۱۶ و والوبیتا و همکاران، ۲۰۱۸ و سگنول و همکاران، ۲۰۱۹) مورد تأیید واقع شده است. البته مطالعات محدودی نیز خلاف این نتیجه‌گیری را گزارش نموده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۲۰).

علاوه بر این‌ها، عدم تأثیرگذاری محسوس اصلاح اندود سطحی با توجه به پراکندگی‌های موجود در داده‌های حاصل از آزمایش نیز از نمودارهای شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) قابل دریافت است.



شکل ۹-۴: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها و اصلاح اندود سطحی پیش از اعمال شرایط رطوبتی



شکل ۱۰-۴: نمودار تغییرات مقاومت برشی ناشی از بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها و اصلاح اندود سطحی پس از اعمال شرایط رطوبتی

به طور مشخص می‌توان به دو دلیل عمده برای پراکندگی نتایج آزمایشات برش مستقیم اشاره داشت. نخست، بکارگیری کاندیشین پیشنهادی که تجربه‌ای مستند در رابطه با صحت عملکرد آن برای اندودهای سطحی در دسترس نبوده است. ارزیابی نتایج به طور کلی نشان می‌دهد که اگرچه شرایط رطوبتی پیشنهادی در مطالعه حاضر عملکرد بهتری نسبت به شرایط پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 به منظور شبیه‌سازی اثرات درازمدت رطوبت بر مقاومت اتصال بین لایه‌های آسفالتی داشته است، اما همچنان نتوانسته به خوبی اثرات تخریبی به همراه داشته باشد. از دلایل مهم این تأثیرگذاری نسبی، می‌توان به نادیده گرفتن تأثیرات یخبندان در فرآیند شبیه‌سازی پیشنهاد شده اشاره نمود.

دلیل مهم دیگری که می‌توان برای عدم همگرایی مناسب داده‌ها در برخی موارد اشاره نمود، عدم توزیع یکنواخت اندود سطحی اجرا شده با قیر خالص است. با وجود تلاش‌های صورت گرفته در این راستا و اهتمام به بکارگیری روش‌هایی که منعکس‌کننده فناوری‌های مورد استفاده در شرایط میدانی است، به دلیل کوچک بودن سطح مقطع زوج نمونه‌های مورد آزمون و نیز کم بودن تکرار آزمون‌ها نسبت به پراکندگی ناشی از توزیع قیر، همگرایی مناسبی حاصل نگردیده است.

فصل پنجم:

جمع بندی نتایج و مشاهدات

۵-۱ نتیجه گیری

پژوهش حاضر یکی از نخستین مطالعاتی است که به بررسی تأثیرات درازمدت رطوبت بر مقاومت اتصال بین لایه‌های آسفالتی پرداخته است. این بررسی‌ها با تمرکز بر بکارگیری اندودهای سطحی حاصل از قیر خالص انجام پذیرفته تا گامی کوچک در جهت گسترش مطالعات محدود اندودهای مذکور برداشته شود. به موازات اهداف اصلی فوق‌الذکر، تلاش گردید تا نقش ژئوسنتتیک‌های پُرکاربرد نیز در مقاومت اتصال بین لایه‌ای سنجیده شده و همچنین تأثیر احتمالی یکی از افزودنی‌های تجاری ضد عریان‌شدگی در جهت بهبود و اصلاح حساسیت رطوبتی اندودهای سطحی مورد ارزیابی قرار گیرد.

آهم یافته‌های مطالعه حاضر را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- ارزیابی تأثیرات شرایط رطوبتی پیشنهادی در استاندارد AASHTO T283 نشان داد که کاندیشن مذکور نمی‌تواند اثرات درازمدت حضور رطوبت را بر اتصال بین لایه‌های آسفالتی با یکدیگر و با ژئوسنتتیک‌ها در آزمایشگاه شبیه‌سازی نماید. در مقابل دیده شد که شرایط رطوبتی غرقابی پیشنهادی از توانایی بیشتری برای شبیه‌سازی اثرات تخریبی درازمدت رطوبت بر اتصالات مذکور برخوردار است.
- بررسی و مقایسه بافت سطحی نمونه‌های آسفالتی قبل، پس از اعمال شرایط یخبندان و پس از اتمام سیکل ذوب و یخ کاندیشن پیشنهادی AASHTO T283 آشکار نمود که شرایط رطوبتی پیشنهادی در استاندارد مذکور عمق بافت سطحی را متأثر نمی‌سازد. این موضوع برای شرایط رطوبتی غرقابی پیشنهادی نیز مورد تأیید قرار گرفت.
- دیده شد که بکارگیری ژئوسنتتیک‌ها در بین لایه‌ها آسفالتی می‌تواند سبب کاهش انتقال تنش‌های برشی میان آنها گردد. این تأثیرات منفی در ژئوگریدها بسیار بیشتر از ژئوتکستایل‌ها است. علاوه بر این مشاهده گردید که اثرات منفی ژئوگریدهای اکستروود شده

بر مقاومت برشی بین لایه‌ای بیش از ژئوگریدهای پیوندخورده می‌باشد.

- بهترین عملکرد برشی در زوج نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک و همچنین زوج نمونه‌های حاوی ژئوتکستایل و ضعیف‌ترین عملکرد در نمونه‌های دارای ژئوگرید اکسترود شده مشاهده شد.
- بررسی‌ها نشان داد که اندود سطحی زوج نمونه‌های دارای ژئوسنتتیک از حساسیت رطوبتی مشابهی با نمونه‌های بدون ژئوسنتتیک برخوردار است. به عبارت دیگر، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها نمی‌تواند بر حساسیت رطوبتی اندودهای سطحی مؤثر باشد.
- به منظور پخش یکنواخت‌تر اندودهای سطحی بر پایه قیرهای خالص می‌توان از ژئوتکستایل در بین دو لایه آسفالتی استفاده نمود.
- اصلاح اندودهای سطحی بوسیله افزودنی ضد عریان‌شدگی بر پایه پلی‌آمین‌های اسید چرب نتوانست بهبودی در مقاومت برشی و حساسیت رطوبتی اتصال بین نمونه‌های آسفالتی ایجاد نماید.

۵-۲ پیشنهادات

در جهت هرچه تکمیل‌تر شدن نتایج پژوهش حاضر پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- ارزیابی دیگر روش‌های شبیه‌سازی رطوبت در آزمایشگاه به منظور بررسی اثرات درازمدت رطوبت بر اتصال بین لایه‌های روسازی آسفالتی
- بررسی دوام رطوبتی سایر انواع اندودهای سطحی بر پایه دیگر انواع قیر (امولسیون، پلیمری و...)
- استفاده از دیگر افزودنی‌های اصلاح‌کننده چسبندگی قیر به منظور بهبود دوام رطوبتی اندودهای سطحی
- مطالعه بر روی دوام رطوبتی سایر انواع میان‌لایه‌های آسفالتی (جاذب تنش و...)

- بکارگیری آزمون‌های دینامیکی به منظور سنجش اثرات مخرب رطوبت بر اتصال بین لایه‌های آسفالتی

منابع و مراجع

AASHTO T283. (2002), " *Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*", AASHTO Provisional Standards: Washington, DC, USA.

Al-Qadi Imad L, Abuawad Ibrahim M, Dhasmana Heena, Coenen Aaron R and Trepanier James S, "Effects of various asphalt binder additives/modifiers on moisture susceptible asphaltic mixtures", Illinois Center for Transportation, (2014).

Al-Qadi I. L, Brandon T. L, Valentine R. J, Lacina B. A, and Smith T. E, (1994). "Laboratory evaluation of geosynthetic-reinforced pavement sections." *Transportation Research Record*, (1439): 25-31.

Ameri Mahmoud, Ziari Hassan, Yousefi Afshar and Behnood Ali. (2021). "Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Thermodynamic Evaluation of the Effects of Antistripping Additives." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(2):04020457.

Apeagyei Alex K, Grenfell James RA and Airey Gordon D. (2014). "Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures." *Construction and Building Materials*, 60:73-80.

Asphalt Institute. (2007) , *The Asphalt Handbook MS-4*, Asphalt Institute, Lexington,KY.

Asphalt Technology News. (2004), "NCAT Completes Evaluation of Relationships of HMA In-place Air Voids, Lift Thickness, and Permeability." *A Publication of the National Center for Asphalt Technology*, Auburn University, Volume 16, Number 1.

ASTM D8-02. (2004), "Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements ", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03.

ASTM D1559. (1998), "Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using marshall apparatus." Annual Book of Astm Standards. Philadelphia PA: American Society for Testing and Materials.

Canestrari Francesco, Ferrotti Gilda, Lu Xiaohu, Millien Anne, Partl Manfred N, Petit Christophe, Phelipot-Mardelé Annabelle, Piber Herald and Raab Christiane. (2013). "Mechanical testing of interlayer bonding in asphalt pavements." Springer.Pp. 303-60 in *Book*.

Caro Silvia, Masad E, Bhasin Amit and Little Dallas N. (2009). "Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores." *Construction and Building Materials*, 23(6):2251-2258.

Collop A.C, Sutanto M.H, Airey G.D and Elliott R.C. (2008). "Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms." *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2):81-98.

Delbono Hector,(2015) doctoral thesis,"Estudio de grillas poliméricas en sistemas anti reflejo de fisuras bajo sollicitaciones dinámicas," Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata.

Destrée Alexandra and De Visscher Joëlle. (2017). "Impact of tack coat application conditions on the interlayer bond strength." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(1):3-13.

Dharmarathna Chamika Prashan,(2018) Master of Science,"Evaluation of the Effect of Tack Coat Type, Application Rate, and Surface Type on Interlayer Shear Strength," Major in Civil Engineering, South Dakota State University.

Garber Nicholas J, and Hoel Lester A. (2009). "*Traffic and highway engineering*", (4th edition.). United States of America, Cengage Learning.

Górszczyk Jarosław and Malicki Konrad. (2020). "Experimental investigation of loading frequency influence on a strength of asphalt interlayer bonding." *Archives of Civil Engineering*, 66(1).

Khweir Kadhim and Fordyce Derek, (2003). "Influence of layer bonding on the prediction of pavement life," presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport.

Lee Shyue Leong, Mannan Mohammad Abdul and Ibrahim Wan Hashim Wan. (2020). "Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface." *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3):230-35.

Leutner R. (1979). "Investigation of the adhesion of bituminous pavements." *Bitumen* 3, 84-91.

Mehrara Amir and Khodaii Ali. (2013). "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete." *Construction and Building Materials*, 38:423-42.

Moghadas Nejad F, Azarhoosh AR, Hamed Gh H and Azarhoosh MJ. (2012). "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt." *Construction and Building Materials*, 31:384-88.

Mohi ud Din Ishfaq Mohi, Mir Mohammad Shafi and Farooq Mohammad Adnan. (2020). "Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Properties of Asphalt Pavements in Cold Regions: A Review." *Transportation Research Procedia*, 48:3634-41.

Nazirizad Mahmoud, Kavussi Amir and Abdi Ali. (2015). "Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures." *Construction and Building Materials*, 84:348-53.

Noory A, Moghadas Nejad Fereidoon and Khodaii A. (2019). "Evaluation of geocomposite-reinforced bituminous pavements with Amirkabir University Shear Field Test." *Road Materials and Pavement Design*, 20(2):259-79.

Offenbacker Daniel,(2019) Doctor of Philosophy,"Evaluation of the Cracking Performance of Geogrid-reinforced Hot-mix Asphalt for Airfield Applications," Department of Civil and Environmental Engineering, Rowan University,

Ran Wuping, Zhang Yu, Li Ling, Shen Xizhong, Zhu Hailin and Zhang Yongbo. (2019). "Characterization of bonding between asphalt concrete layer under water and salt erosion." *Materials*, 12(19):3055.

Raposeiras AC, Castro-Fresno D, Vega-Zamanillo A and Rodriguez-Hernandez J. (2013). "Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers." *Construction and Building Materials*, 43:372-81.

Recasens Miró , Martinez A, and Jiménez Pérez. (2005). "Assessing heat-adhesive emulsions for tack coats." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 158(1):45-51.

Sagnol Loba, Quezada Juan Carlos, Chazallon Cyrille and Stöckner Markus. (2019). "Effect of glass fibre grids on the bonding strength between two asphalt layers and its Contact Dynamics method modelling." *Road Materials and Pavement Design*, 20(5):1164-81.

Saride Sireesh and Kumar V Vinay. (2017). "Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements." *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3):184-196.

Sayadi Mina and Hesami Saeid. (2017). "Performance evaluation of using electric arc furnace dust in asphalt binder." *Journal of Cleaner Production*, 143:1260-1267.

Sengul Celaleddin E, Aksoy Atakan, Iskender Erol and Ozen Halit. (2012). "Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance." *Construction and Building Materials*, 30:139-48.

Sholar G A, Page G C, Musselman J A, Upshaw P B and Moseley H L. (2004). " Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coats (with discussion). " *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 73: 771-806.

Shukla Sanjay Kumar. (2017) , "An introduction to geosynthetic engineering", CRC Pressin Book.

Si Wei, Ma Biao, Li Ning, Ren Jun-ping and Wang Hai-nian. (2014). "Reliability-based assessment of deteriorating performance to asphalt pavement under freeze–thaw cycles in cold regions." *Construction and Building Materials*, 68:572-79.

Some Saannibe Ciryle, Feeser Arnaud, Jaoua Mouna and Le Corre Thierry. (2020). "Mechanical characterization of asphalt mixes inter-layer bonding based on reptation theory." *Construction and Building Materials*, 242:118063.

Sudarsanan Nithin, Karpurapu Rajagopal and Amrithalingam Veeraragavan, (2016). "Critical review on the bond strength of geosynthetic interlayer systems in asphalt overlays," presented at the Japanese Geotechnical Society Special Publication.

Sutanto Muslich Hartadi, (2010) Doctor of Philosophy "Assessment of bond between asphalt layers," Department of Civil Engineering University of Nottingham,

Tarefder Rafiqul A and Zaman Arif M. (2010). "Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7):714-25.

Uzan J, Livneh Moshe and Eshed Y. (1978). "Investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layers." *Asph. Paving Technol*, 47:495-521.

Vaitkus Audrius, Žilionienė Daiva, Paulauskaitė Sabina, Tuminienė Faustina and Žiliūtė Laura. (2011). "Research and assessment of asphalt layers bonding." *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 6(3):210-18.

Vinay Kumar V, Saride Sireesh and Peddinti Pranav RT. (2017). "Interfacial shear properties of geosynthetic interlayered asphalt overlays." Pp. 442-51 in *Book*.

Walubita Lubinda F, Nyamuhokya Tito P, Komba Julius J, Tanvir Hossain Ahmed, Souliman Mena I and Naik Bhaven. (2018). "Comparative assessment of the interlayer shear-bond strength of geogrid reinforcements in hot-mix asphalt." *Construction and Building Materials*, 191:726-35.

Wellner Frohmut and Daniel Ascher. "Untersuchungen zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen." *Schlussbericht zum AiF-Projekt 13589* (2007).

West Randy C, Zhang Jingna and Moore Jason, "Evaluation of bond strength between pavement layers," Auburn University. National Center for Asphalt Technology, (2005).

Xiao Feipeng, Zhao Wenbin, Gandhi Tejash and Amirkhanian Serji N. (2010). "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(10):1047-55.

Yilmaz Altan and SARGIN Şebnem. (2012). "Water effect on deteriorations of asphalt pavements." *TOJSAT*, 2(1):1-6.

Zamora-Barraza David, Calzada-Peréz Miguel, Castro-Fresno Daniel and Vega-Zamanillo Angel. (2010). "New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture." *Geotextiles and Geomembranes*, 28(5):483-89.

Zhang Weiguang. (2017). "Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States." *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5):434-45.

Zieliński Piotr. (2011). "Investigations of geosynthetic interlayer bonding in asphalt layers." *Archives of Civil Engineering*, 57(4):401-23.

اسلامی م، (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی نقش و تاثیر ژئوسنتتیک‌ها در کنترل ترک‌های روسازی"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور تهران .

امیری حسینی ح، (۱۳۸۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "اثر ژئوسنتتیک‌ها بر افزایش عمر خستگی روسازی‌های آسفالتی"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

بیگلری معین، اصغرزاده سید محمد و کاووسی امیر. (۱۳۹۶) "بررسی عوامل موثر بر چسبندگی بین لایه ی روسازی بتن غلتکی و میان لایه ی ماسه آسفالت جاذب تنش." فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل، ۹(ویژه نامه روسازی):۸۹-۱۰۴.

پیرعلایی م، (۱۳۹۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، "بررسی اثر استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در کاهش هزینه پروژه های روسازی با افزایش عمر و کاهش هزینه نگهداری"، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه.

تقوی‌زواره ح، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد "نقش گوگاس (سولفور پلیمری) در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم"، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

کاووسی امیر و بختیاری جواد. (۱۳۹۴). "بررسی همزمان اثر پارامترهای دما و نوع ماده ی افزودنی بر خرابی های وابسته به رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی داغ." مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱):۲۲-۱۱.

نبی ف، (۱۳۹۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد اندودهای سطحی"،
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

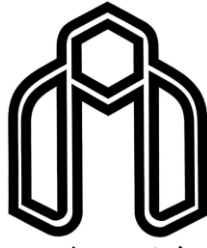
نشریه شماره ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران – تجدید نظر اول سال ۱۳۹۰)

نشریه شماره ۱۰۱ (مشخصات فنی عمومی راه – تجدید نظر دوم سال ۱۳۹۲)

Abstract

Asphalt pavements are multilayer systems that can be reinforced by geosynthetics. Geosynthetics are often installed by asphaltic coats between asphalt layers to ensure the distribution and transfer of stress between them and the asphalt mixture. Damage to the geosynthetic connection with asphalt layers can cause increased stresses in the upper pavement layers and ultimately lead to premature failure. Moisture penetration into pavement layers is one of the most destructive factors in the connection of tack coats with geosynthetics and asphalt mixtures. In the present study, direct shear test was used to investigate the long-term effects of moisture on the bond strength of tack coats. In this regard, cylindrical asphalt samples made in the laboratory are connected in pairs by tack coats based on pure bitumen 60-70 to form pairs of final samples. Three types of geosynthetics including: geotextile, bonded geogrid and chicken wire (representing extruded geogrids) were used to make the pairs. To evaluate the effect of bitumen modification with anti-stripping additives, a commercial additive based on fatty acid polyamines in the amounts of 0.2, 0.3 and 0.4% was used. In order to simulate the long-term effects of moisture on the tack coats connections, AASHTO T283 standard moisture conditioning and a proposed moisture conditioning were used. The results showed that the AASHTO T283 moisture conditioning does not have the ability to simulate the long-term effects of moisture on tack coats. The analysis of the results also revealed that used anti-stripping additive could not have an effect on the shear strength of tack coats connections. In addition, it was observed that the use of geosynthetics - especially geogrids - between asphalt layers may reduce the shear bearing capacity between them. The weakest shear performance was observed in the specimens containing the extruded geogrid, but in general the specimens with and without geosynthetics showed almost the same moisture sensitivity.

Keywords: Asphalt mixture, Geosynthetics, Tack coat, Moisture sensitivity, Direct shear test



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Roads and Transport Engineering

**Evaluation of moisture sensitivity of geosynthetics bonding with
asphalt overlays**

By:

Amir Reza Paya

Supervisor:

Dr. Iman Aghayan

October 2021