

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی راه و ترابری

بررسی تأثیر لایه‌میانی مستهلک کننده ترک در روسازی آسفالتی

دانشجو:

هادی باغانی پور

اساتید راهنما:

دکتر ایمان آقایان

دکتر سیدعلی حسینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۸

تقدیم بہ

پدرو مادر عزیزو خواہراں نازنینم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌بینم تا قدردان زحمات و محبت‌های کسانی باشم که وجودشان مایه دلگرمی من بوده و کمک‌هایشان به انجام رساندن این پژوهش را ممکن ساخته است. نخست خانواده عزیزم که همواره همراه و پشتیبان من بوده‌اند. آنان که محبتشان مهم‌ترین انگیزه من برای کار و تلاش است.

اینان مگر ز رحمت محض آفریده‌اند

کارام جان و انس دل و نور دیده‌اند

سپس از اساتید گران‌قدر جناب آقای دکتر ایمان آقایان و جناب آقای دکتر سیدعلی حسینی، اساتید راهنما که نقاط قوت این کار حاصل راهنمایی‌های بسیار ارزشمند ایشان، و نقاط ضعف آن نتیجه اهمال اینجانب می‌باشد. خداوند بزرگ را شاکرم که توفیق به سرانجام رساندن یک تجربه ارزشمند در کنار این اساتید را نصیب من کرد و از درگاهش برای ایشان همواره آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

در بزم عشق شمع فروزان معلم است

مردم چو پیکرند اگر، جان معلم است

همچنین تشکر و احترام فراوان تقدیم به جناب آقای دکتر حسین قاسم‌زاده طهرانی و جناب آقای دکتر عبدالاحد چوپانی که داوری پایان‌نامه را انجام دادند.

تعهد نامه

اینجانب هادی باغانی پور..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران / راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر لایه میانی مستهلک کننده ترک در روسازی آسفالتی ... تحت راهنمایی...دکتر ایمان آقایان و دکتر سیدعلی حسینی... 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 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 می باشد 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 امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

یکی از روش‌های متداول برای تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها، روکش آسفالتی است. اما مهمترین نقص این روش انتشار و انعکاس خرابی‌ها و ترک‌های موجود در روسازی زیرین به لایه روکش است، که به آن‌ها ترک‌های انعکاسی گفته می‌شود. عوامل متعددی در وقوع ترک انعکاسی مؤثر هستند، به همین دلیل نمی‌توان به طور کامل از انتشار آن جلوگیری کرد، تنها می‌توان با استفاده از راهکارهای گوناگون وقوع آن را به تعویق انداخته و سرعت رشد و انتشار آن‌ها را کاهش داد. برای به تعویق انداختن رشد این ترک‌ها و افزایش عمر سرویس‌دهی روکش‌های آسفالتی تاکنون تحقیقات گوناگونی انجام شده است. یکی از روش‌های پرکاربرد که مورد نظر محققان بوده و عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده، استفاده از یک لایه مستهلک کننده ترک بین لایه روسازی ترک‌خورده زیرین و لایه روکش است که بدین منظور از محصولات ژئوسنتتیکی و یا یک لایه آسفالت ماسه‌ای یا ریزدانه استفاده می‌شود. امروزه با توجه به کمبود منابع انرژی، نقش اقتصادی و زیست محیطی استفاده مجدد از مصالح بازیافتی بیشتر و مهم‌تر است. از این مصالح نیز می‌توان به عنوان میان‌لایه در روسازی‌های آسفالتی استفاده نمود. در این پایان‌نامه از آزمون خمش سه نقطه‌ای به منظور بررسی تأثیر استفاده از این میان‌لایه‌ها استفاده شده است. عملکرد ۴ نوع میان‌لایه‌ی مختلف در نمونه‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌های کنترلی بررسی شده است. میان‌لایه‌های به کاررفته عبارتند از: آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر. نمونه‌های آزمایشگاهی در سه لایه شامل لایه روسازی ترک‌خورده زیرین، میان‌لایه و لایه روکش و نمونه‌های کنترلی در دو لایه شامل لایه روسازی ترک‌خورده زیرین و لایه روکش تهیه شدند. سه حالت برای محل قرارگیری ترک شامل: ترک میانی، ترک دوگانه و ترک کناری در لایه روسازی زیرین در نظر گرفته شد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر نوع میان‌لایه، سرعت و نرخ بارگذاری و محل قرارگیری ترک بر روی پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی است. نتایج بدست آمده نشان داد که از بین ۴ میان‌لایه به کاررفته، میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر عملکرد بهتری دارد و نیروی گسیختگی در نمونه‌های با میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است اما انرژی شکست آن، به دلیل تغییر شکل گسیختگی کمتر نسبت به میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای، کمتر است که بدین منظور می‌توان درصد قیر لازم برای تثبیت آسفالت بازیافتی را افزایش داد و یا از مواد جوانساز استفاده نمود.

کلمات کلیدی: ترک انعکاسی، میان‌لایه مستهلک‌کننده ترک، RAP، اساس تثبیت شده با

سیمان، آسفالت بازیافتی، انرژی شکست، سختی شکست

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱- اهداف	۴
۴-۱- نوآوری پژوهش	۵
۵-۱- ساختار پایان نامه	۵
فصل ۲: مروری بر مطالعات گذشته	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- روسازی آسفالتی	۸
۳-۲- لایه روکش آسفالتی	۸
۴-۲- ترک انعکاسی	۹
۵-۲- لایه میانی مستهلک کننده ترک	۱۰
۶-۲- انواع میان لایه های مستهلک کننده ترک	۱۰
۱-۶-۲- میان لایه ماسه آسفالت	۱۱
۲-۶-۲- میان لایه کامپوزیت	۱۲
۳-۶-۲- میان لایه های ژئوسنتتیک	۱۲
۴-۶-۲- میان لایه آسفالتی با قیر پلیمری	۱۳
۵-۶-۲- میان لایه های ساخته شده از الیاف و قیر	۱۳
۷-۲- مروری بر مطالعات گذشته	۱۴
فصل ۳: تئوری ها و روش ها	۳۳
۱-۳- مقدمه	۳۴
۲-۳- ترک ها در روسازی	۳۴
۱-۲-۳- عوامل ایجاد ترک در روسازی	۳۴
۲-۲-۳- انواع ترک	۳۵
۳-۲-۳- مسیر رشد ترکها	۳۵

۳۷	۳-۳- تئوری آزمون خمش سه نقطه ای
۳۸	۳-۴- آزمایش تراکم
۴۰	۳-۵- آزمایش تجزیه آسفالت
۴۱	۳-۶- طرح اختلاط
۴۱	۳-۶-۱- آزمایش مارشال
۴۲	۳-۷- روابط وزنی - حجمی

فصل ۴: فعالیت های آزمایشگاهی ۴۵

۴۶	۴-۱- مقدمه
۴۶	۴-۲- مواد و مصالح به کاررفته و خواص آنها
۴۶	۴-۲-۱- مصالح سنگی
۴۹	۴-۲-۲- قیر
۵۱	۴-۳- طرح اختلاط به روش مارشال
۵۲	۴-۴- آزمایش تراکم
۵۲	۴-۵- آزمایش تجزیه آسفالت
۵۴	۴-۶- تهیه نمونه های دال آسفالتی
۵۴	۴-۶-۱- لایه روسازی زیرین
۵۶	۴-۶-۲- لایه میانی مستهلک کننده ترک
۵۸	۴-۶-۳- لایه روکش آسفالتی
۵۸	۴-۷- دستگاه بارگذاری
۶۰	۴-۸- شرح آزمایش

فصل ۵: نتایج فعالیت های آزمایشگاهی ۶۱

۶۲	۵-۱- مقدمه
۶۳	۵-۲- محاسبه پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی
۶۴	۵-۳- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر نیروی گسیختگی (نیروی شکست)
۶۴	۵-۳-۱- سرعت بارگذاری
۶۶	۵-۳-۲- نوع میان لایه به کاررفته

۶۶	..... ۵-۳-۳- محل قرارگیری ترک
۶۸	..... ۵-۴- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر تغییر مکان گسیختگی نمونه ها
۶۸	..... ۵-۴-۱- سرعت بارگذاری
۷۰	..... ۵-۴-۲- نوع میان لایه به کاررفته
۷۰	..... ۵-۴-۳- محل قرارگیری ترک
۷۲	..... ۵-۵- سختی شکست و انرژی شکست
۷۴	..... ۵-۶- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر سختی شکست و انرژی شکست
۷۴	..... ۵-۶-۱- سرعت بارگذاری
۷۴	..... ۵-۶-۲- نوع میان لایه به کاررفته
۷۵	..... ۵-۶-۳- محل قرارگیری ترک
۷۷	..... فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۸	..... ۶-۱- نتیجه گیری
۷۹	..... ۶-۲- پیشنهادات

فهرست تصاویر

- شکل (۱-۲) تنشهای ناشی از بار چرخ [۱] ۱۰
- شکل (۲-۲) محصولات ژئوستتیک: الف: ژئوتکستایل ب: ژئوگرید ج: ژئوکامپوزیت ۱۳
- شکل (۳-۲) حالات ایجاد ترک انعکاسی در نمونه های حاوی ژئوگرید [۱] ۱۵
- شکل (۴-۲) مقطع روسازی مدلسازی شده در آنالیز دو بعدی (شکل a) و آنالیز سه بعدی (شکل b) [۱۴] ۱۶
- شکل (۵-۲) شکل شماتیک آزمون خمش سه نقطه ای [۱۶] ۱۷
- شکل (۶-۲) شکل شماتیک آزمون انتشار ترک [۱۶] ۱۷
- شکل (۷-۲) شماتیک از نمونه های آزمایش [۱۷] ۱۸
- شکل (۸-۲) شماتیک از نمونه های آزمایش تحت بارگذاری چهارنقطه ای [۱۷] ۱۸
- شکل (۹-۲) شکل شماتیک نمونه های آزمایشگاهی تحت آزمون خمش چهارنقطه ای [۱۸] ۱۹
- شکل (۱۰-۲) توزیع تنش ها در نمونه دارای میان لایه [۱۸] ۱۹
- شکل (۱۱-۲) توزیع تنش فرض شده با توجه به رشد و انتشار ترک از کف نمونه و میان لایه [۱۸] ۱۹
- شکل (۱۲-۲) عمر خستگی نمونه های تقویت شده با ژئوگرید [۱۹] ۲۰
- شکل (۱۳-۲) کرنش کششی در نمونه های تقویت شده با ژئوگرید [۱۹] ۲۱
- شکل (۱۴-۲) شکل شماتیک نمونه دال آسفالتی [۲۰] ۲۱
- شکل (۱۵-۲) تغییر شکل دائمی نمونه ها نسبت به عمر خستگی آنها در نسبت بارگذاری مختلف [۲۰] ۲۲
- شکل (۱۶-۲) دستگاه آزمایش (UTM-25) [۲۱] ۲۳
- شکل (۱۷-۲) شکل شماتیک نمونه دال آسفالتی [۲۱] ۲۴
- شکل (۱۸-۲) نمونه دال آسفالتی تحت آزمایش بارگذاری دینامیکی دستگاه UTM [۲۲] ۲۵
- شکل (۱۹-۲) شکل شماتیک نمونه دال آسفالتی [۲۲] ۲۵
- شکل (۲۰-۲) دستگاه آزمایش عبور چرخ (Wheel Track) [۲۳] ۲۶
- شکل (۲۱-۲) شماتیک از نمونه های آزمایش: بدون میان لایه جاذب تنش (a)، دارای میان لایه جاذب تنش (b) ۲۷
- شکل (۲۲-۲) تهیه آسفالت لاستیکی طی فرآیند خشک [۲۵] ۲۸
- شکل (۲۳-۲) شماتیک نمونه های دال آسفالتی [۲۴] ۲۹
- شکل (۲۴-۲) شکل شماتیک نمونه دال آسفالتی تحت آزمون عبور چرخ [۲۴] ۲۹

- شکل (۲-۲۵) میان لایه های ژئوسنتتیکی به کاررفته [۲۶]..... ۳۰
- شکل (۳-۱) انواع مودهای ترک خوردگی..... ۳۵
- شکل (۳-۲) انواع مسیرهای رشد ترک [۳۰]..... ۳۶
- شکل (۳-۳) رشد و انتشار ترکهای اولیه (نوع A) و ترکهای ثانویه (نوع B) به درون لایه روکش [۳۰]... ۳۷
- شکل (۳-۴) چکش متراکم کننده آزمون تراکم استاندارد..... ۳۹
- شکل (۳-۵) دستگاه استراکشن آسفالت..... ۴۰
- شکل (۴-۱) نمودارهای تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال..... ۵۳
- شکل (۴-۲) نمودار وزن مخصوص خشک- درصد رطوبت..... ۵۴
- شکل (۴-۳) شماتیکی از نمونههای آزمایش و محل قرارگیری ترک ها..... ۵۵
- شکل (۴-۴) جک هیدرولیکی و قالب تراکم دال های آسفالتی..... ۵۵
- شکل (۴-۵) میکسر آسفالت..... ۵۶
- شکل (۴-۶) نمونه آسفالتی با میان لایه اساس تثبیت شده..... ۵۷
- شکل (۴-۷) مصالح آسفالت بازیافتی دانه بندی شده..... ۵۷
- شکل (۴-۸) دستگاه بارگذاری خمش سه نقطه ای..... ۵۹
- شکل (۴-۹) فیسکچر بارگذاری خمش سه نقطه ای..... ۵۹
- شکل (۵-۱) نیروی گسیختگی نمونه های دارای ترک میانی..... ۶۴
- شکل (۵-۲) نیروی گسیختگی نمونه های دارای ترک دو گانه..... ۶۵
- شکل (۵-۳) نیروی گسیختگی نمونه های دارای ترک کناری..... ۶۵
- شکل (۵-۴) نیروی گسیختگی در نمونه ها (سرعت بارگذاری ۰/۷ میلی متر بر دقیقه)..... ۶۷
- شکل (۵-۵) نیروی گسیختگی در نمونه ها (سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه)..... ۶۷
- شکل (۵-۶) تغییر شکل گسیختگی نمونه های دارای ترک میانی..... ۶۸
- شکل (۵-۷) تغییر شکل گسیختگی نمونه های دارای ترک دو گانه..... ۶۹
- شکل (۵-۸) تغییر شکل گسیختگی نمونه های دارای ترک کناری..... ۶۹
- شکل (۵-۹) تغییر شکل گسیختگی در نمونه ها (سرعت بارگذاری ۰/۷ میلی متر بر دقیقه)..... ۷۱
- شکل (۵-۱۰) تغییر شکل گسیختگی در نمونه ها (سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه)..... ۷۱
- شکل (۵-۱۱) نمودار نیرو-تغییر شکل نمونه اساس تثبیت شده (سرعت 5mm/min ، ترک کناری)..... ۷۲
- شکل (۵-۱۲) نمودار نیرو-تغییر شکل نمونه اساس تثبیت شده (سرعت 0.7mm/min ، ترک کناری)..... ۷۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۴) دانه بندی مخلوطهای آسفالتی [نشریه ۲۳۴]..... ۴۷
- جدول (۲-۴) دانه بندی مصالح اساس [نشریه ۲۳۴]..... ۴۸
- جدول (۳-۴) نتایج آزمایشات مرغوبیت مصالح سنگی..... ۴۸
- جدول (۴-۴) درصد جذب آب و وزن مخصوص مصالح سنگی*..... ۴۹
- جدول (۵-۴) مشخصات و خصوصیات قیر خالص مصرفی..... ۵۰
- جدول (۶-۴) مشخصات و خصوصیات قیر محلول (MC-250)..... ۵۱
- جدول (۱-۵) مشخصات نمونه های آزمایش آنها به همراه نام اختصاری (کد گذاری)..... ۶۲
- جدول (۲-۵) نتایج آزمون خمش سه نقطه ای..... ۶۳
- جدول (۳-۵) انرژی شکست و سختی شکست..... ۷۳

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- مقدمه

ترک‌ها در روسازی آسفالتی^۲ یکی از شایع‌ترین خرابی‌ها هستند که به دو دسته‌ی سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم می‌شوند. دو عامل اصلی ایجاد ترک‌ها آب‌وهوا و دیگری عامل بار و ترافیک می‌باشد. علت اصلی پیدایش ترک‌های غیرسازه‌ای چرخه‌های متوالی آب‌وهوایی (سرد و گرم شدن) است و سپس بر اثر تکرار بارگذاری و سایر عوامل تشدید شده و گسترش می‌یابند. در نهایت ترک‌های غیرسازه‌ای با رشد بیشتر ساختار سازه‌ای خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و یا زمینه‌ساز ایجاد و یا تشدید ترک‌های سازه‌ای می‌شوند. ترک‌هایی که تحت تأثیر بارگذاری ایجاد می‌شوند به نام ترک‌های خستگی شناخته می‌شوند و دلیل این نام‌گذاری تکرار روند عبور بار از روی سطح روسازی و وقوع پدیده‌ی خستگی می‌باشد. ترک‌های خستگی عمدتاً در دسته‌ی ترک‌های سازه‌ای قرار می‌گیرند.

هنگامی که یک روسازی دچار اضمحلال و خرابی می‌شود، بنابر شدت خرابی می‌توان رویکرد تعمیراتی خاصی در پیش گرفت. این تعمیرات می‌تواند از بدون اقدام قرار دادن خرابی تا وصله‌های عمیق و حتی تعویض خاک بستر روسازی باشد. یکی از کاربردی‌ترین روش‌های مرمت روسازی‌ها استفاده از روکش‌ها است. وقتی یک لایه روکش بر روی لایه روسازی قدیمی ترک‌خورده قرار می‌گیرد، پس از مدتی ترک‌های موجود در لایه‌ی زیرین به لایه‌ی روکش نفوذ می‌کنند. زیرا انقباض و انبساط خاک بستر و روسازی راه ناشی از تغییرات حرارت و همچنین بارگذاری ترافیکی موجب حرکت روسازی در نزدیکی درز و ترک‌ها شده و این حرکت‌ها باعث ایجاد تنش‌های کششی و برشی در لایه روکش جدید می‌گردند. هنگامی که مقدار این تنش‌ها از مقاومت لایه روکش بیشتر شود، ترک‌ها در این لایه گسترش می‌یابند که این امر موجب کاهش عمر سرویس‌دهی لایه‌روکش جدید خواهد شد. این گسترش الگوی ترک خوردگی از روسازی ترک‌خورده زیرین به لایه روکش جدید را ترک انعکاسی^۳ می‌گویند. ترک انعکاسی پدیده‌ای پیچیده است و عوامل متعددی در وقوع آن مؤثر هستند، به همین دلیل نمی‌توان به‌طور کامل از وقوع آن جلوگیری کرد و تنها می‌توان به کمک روش‌های مختلفی آن را به تعویق انداخت که متداول‌ترین روش قرار دادن میان‌لایه^۴ بین لایه روکش و روسازی قدیمی است.

محققان زیادی به کمک مفهوم مکانیک شکست، که به مطالعه‌ی پیدایش و گسترش ترک در

^۱ Crack

^۲ Asphalt Concrete Pavement

^۳ Reflection Cracking

^۴ Interlayer

مصالح گوناگون می‌پردازد، به بررسی پیدایش و انتشار ترک در روسازی‌های آسفالتی پرداخته‌اند. بررسی پارامترهای شکست در مخلوط‌های آسفالتی به کمک آزمون‌های مختلفی از جمله: آزمون خمش سه نقطه‌ای، آزمون خمش چهار نقطه‌ای، آزمون خمش نیم‌دایره، آزمون کشش نمونه متراکم دایره‌ای انجام می‌شود. در این پروژه از آزمون خمش سه نقطه‌ای به منظور تعیین پارامترهای شکست آسفالت استفاده شده است.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

ساخت و توسعه راه‌ها علاوه بر هزینه‌های اولیه‌ی بالا، دارای هزینه‌های نسبتاً زیاد نگهداری می‌باشد. از سویی دیگر در کشور ما به عنوان یک کشور در حال توسعه شاهد افزایش روزافزون سطح ترافیک عبوری و بارگذاری بیشتر بر راه‌ها و در نتیجه‌ی آن تشدید و گسترش ترک‌ها هستیم. همچنین از لحاظ جغرافیایی به علت قرار گرفتن بخش زیادی از ایران در مناطق کوهستانی، کاهش دما و ترد شدن سطح روبه‌ی آسفالتی در این مناطق، خود عاملی بر تشدید رشد ترک‌ها می‌باشد.

در صورت داشتن درک صحیحی از نوع روکش به کار رفته و لایه‌ی میانی در آسفالت و عملکرد آن تحت تأثیر بارگذاری‌ها و میزان تأثیر لایه‌ی میانی بر گسترش ترک‌ها، می‌توان با انتخاب یک لایه‌ی میانی مناسب از نظر جنس و ضخامت، هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها را کاهش و عمر روسازی راه‌ها افزایش داد.

تاکنون در تحقیقات متعددی از محصولات ژئوسنتتیکی به عنوان میان‌لایه استفاده شده است. اما استفاده از این محصولات هزینه‌های اضافی دارد. علاوه بر این برخی محصولات ژئوسنتتیکی مانند ژئوتکستایل یا کامپوزیت اشباع از قیر می‌تواند آب‌های سطحی را درون لایه روکش محبوس نماید، به خصوص وقتی که روکش آسفالتی به اندازه کافی متراکم نشده باشد، که می‌تواند برای عملکرد آن زیان‌آور باشد. در مواردی که لایه روکش نفوذپذیری زیادی داشته و یک لایه آب‌بند مانند ژئوتکستایل روی سطح روسازی قدیمی قرار گرفته است، خرابی‌ها سریع‌تر در لایه روکش ایجاد می‌شوند. همچنین ژئوتکستایل‌ها در کاهش بالا آمدن و به تأخیر انداختن انعکاس ترک‌های حرارتی تأثیری ندارند و این ترک‌ها به سرعت گسترش می‌یابند. روکش‌های آسفالتی اجرا شده بر روی ژئوسنتتیک‌ها در نواحی بارش سنگین و مناطقی که چرخه‌های ذوب و یخبندان متعددی را تجربه می‌کنند، موفقیت چندانی کسب نمی‌کنند.

بدین منظور یکی از راهکارهای مناسب استفاده از مصالح آسفالتی بازیافتی^۱ است. در دنیا حجم زیادی از آسفالت تخریب شده در محیط زیست رها می‌شود، در صورتی که این آسفالت می‌تواند بازیافت شده و دوباره همراه اصلاحات یا بدون اصلاحات به عنوان میان‌لایه در روسازی استفاده شود.

۱-۳- اهداف

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر لایه میانی مستهلک کننده ترک در روسازی آسفالتی می‌باشد. در این تحقیق عملکرد ۴ نوع میان‌لایه‌ی مختلف در روکش‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌های کنترلی بررسی شده است. میان‌لایه‌های به‌کاررفته عبارتند از: مصالح آسفالت بازیافتی، آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر، مصالح اساس تثبیت شده با سیمان و میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای (آسفالت ریزدانه). اهداف اصلی این پایان‌نامه شامل موارد زیر است:

- ارزیابی آزمایشگاهی کنترل گسترش ترک در مخلوط‌های آسفالتی دولایه با استفاده از یک لایه‌ی میانی مستهلک کننده‌ی ترک با استفاده از دستگاه یونیورسال در دو مود ترک I و II .
- تعیین درصد بهینه‌ی قیر برای تهیه‌ی مخلوط آسفالتی و درصد بهینه سیمان و رطوبت برای استفاده در میان‌لایه‌ها
- بررسی تأثیر جنس لایه میانی بر روند گسترش ترک و جلوگیری از انتشار آن در روکش آسفالتی
- ارزیابی اثرات افزودن چسباننده‌های مختلف به مصالح لایه میانی در جلوگیری و به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی
- ارزیابی تأثیر محل قرارگیری ترک در لایه روسازی قدیمی بر روند انتشار ترک‌ها در لایه روکش
- ارزیابی تأثیر نرخ بارگذاری بر روند انتشار ترک‌ها در لایه روکش
- بررسی و تعیین نقاط ضعف و قوت استفاده از این میان‌لایه‌ها در نمونه‌های آسفالتی

^۱ Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

۴-۱- نوآوری پژوهش

استفاده از لایه‌میانی مستهلک کننده ترک در روسازی‌های آسفالتی در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است. بسیاری از این میان‌لایه‌ها در کشور ناشناخته می‌باشند و یا در نحوه اجرای آن‌ها در پروژه‌های راهسازی ابهامات زیادی وجود دارد. در این پژوهش کارایی میان‌لایه‌های مستهلک کننده ترک در آزمایشگاه و همچنین تاثیر استفاده از چسباننده‌های مختلف مانند قیر و سیمان به عنوان تثبیت کننده در این میان‌لایه‌ها و دیگر پارامترهای موثر بر عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این چون سالانه حجم زیادی از آسفالت تخریب شده در محیط زیست رها می‌شود و در نتیجه آلودگی‌های زیست محیطی را به دنبال دارد، در این تحقیق سعی شده است که برای تهیه و ساخت لایه‌میانی مستهلک کننده ترک از مصالح آسفالت بازیافتی استفاده گردد تا علاوه بر افزایش عمر سرویس دهی روسازی، هم هزینه‌های اجرایی کاهش یابد و هم از آسیب‌های این مواد و مصالح در طبیعت جلوگیری شود.

۵-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل تهیه و تنظیم شده است:

در فصل اول ضمن بیان مقدمه‌ای کوتاه، اهداف تحقیق و جنبه‌ی نوآوری این پروژه بیان گردیده است. در فصل دوم، مطالعات و تحقیقات پیشین بیان شده است. در فصل سوم، روش‌ها و تئوری‌های آزمایشات به‌کاررفته در این تحقیق به طور کامل ارائه شده است. در فصل چهارم، فعالیت‌های آزمایشگاهی انجام شده، توضیح داده شده‌اند. در فصل پنجم، نتایج بدست آمده از فعالیت‌های آزمایشگاهی به طور کامل تفسیر شده است. در فصل ششم، نتایج حاصل از این پژوهش به همراه پیشنهادات به اختصار بیان شده‌اند. در فصل هفتم از این پایان‌نامه نیز منابع و مراجع ارائه گردیده است.

فصل ۲: مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

در این فصل تحقیقات و آزمایشات محققان مختلف در زمینه‌ی استفاده از میان‌لایه‌های مستهلک کننده ترک و جاذب تنش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. قبل از مطالعات و تحقیقات انجام شده، لازم است مقدمه‌ای بیان گردد. این مباحث شامل آشنایی با روسازی‌های انعطاف پذیر، لایه روکش آسفالتی، ترک انعکاسی، لایه‌میانی مستهلک کننده ترک و انواع آن می‌باشد.

۲-۲- روسازی آسفالتی^۱

روسازی‌های انعطاف‌پذیر (آسفالتی) از قیر و مصالح دانه‌ای ساخته می‌شوند. اولین راه آسفالتی در سال ۱۸۷۰ در ایالات متحده و در ایالت نیوجرسی ساخته شد. اولین ورقه‌های آسفالتی با مخلوط قیر خالص گرم با مصالح دانه‌ای و فیلرهای معدنی در سال ۱۸۷۶ در خیابان پنسیلوانیا در واشینگتن اجرا شد. مطابق گزارش FHWA تا سال ۲۰۰۱، ۲٫۵ میلیون مایل راه روسازی شده در ایالات متحده ساخته شده که ۹۴٪ آن آسفالتی است. روسازی‌های انعطاف‌پذیر، سیستم‌های لایه‌ای شامل مصالح مرغوب در بالا که شدت تنش در آن‌ها زیاد و مصالح با مرغوبیت کمتر در پایین که شدت تنش‌ها در آن‌ها کمتر است، می‌باشند که این امر موجب اقتصادی شدن این روسازی‌ها شده است.

۲-۳- لایه روکش آسفالتی^۲

استفاده از روسازی‌های آسفالتی در بسیاری از کشورهای جهان متداول می‌باشد. در راستای توسعه‌ی حمل و نقل به عنوان یکی از ارکان توسعه و پیشرفت کشورها، بشر همواره در تلاش برای افزایش جاده‌های آسفالت شده و با کیفیت می‌باشد. به همین دلیل محققان همواره در تلاش هستند تا با ارائه‌ی تکنولوژی‌های جدید کیفیت استفاده از روسازی‌ها را ارتقا دهند. بازسازی و ترمیم روسازی راه‌ها یکی از مهمترین مشکلاتی است که کشورهای توسعه یافته و همچنین کشورهای در حال توسعه با آن مواجه هستند. یکی از مهمترین نکاتی که در بحث بازسازی روسازی راه‌ها باید مد نظر قرار گیرد، آن است که عملیات تعمیر و نگهداری باید قبل از رسیدن کیفیت روسازی به شرایط بحرانی انجام گیرد. همانطور که گفته شد یکی از کاربردی‌ترین روش‌های بازسازی روسازی‌ها استفاده از یک لایه روکش

^۱ Asphalt Concrete Pavement

^۲ Overlay

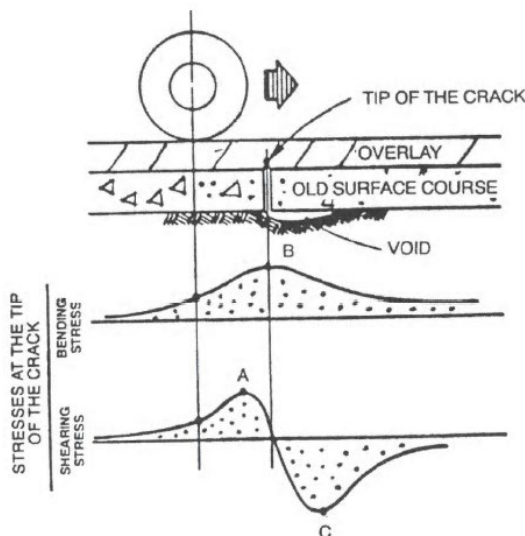
است. با ایجاد ترک و خرابی‌های مختلف در سطح روسازی، رطوبت از طریق درز و ترک‌های موجود به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند که ایجاد روکش از این امر جلوگیری کرده و در نتیجه عمر سرویس دهی و ظرفیت باربری روسازی را افزایش می‌دهد. از دیگر فواید ایجاد لایه روکش می‌توان به افزایش مقاومت لغزشی، کاهش ناهمواری‌ها و در نتیجه افزایش کیفیت سواری اشاره کرد.

۲-۴- ترک انعکاسی^۱

همانطور که گفته شد استفاده از لایه روکش برای بازسازی روسازی راه‌ها یکی از روش‌های تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها است، اما پس از مدت کوتاهی مجدداً ترک‌ها در سطح لایه روکش پدیدار می‌شوند که به آن‌ها ترک‌های انعکاسی می‌گویند. علت این نامگذاری آن است که این ترک‌ها در حقیقت انعکاس ترک‌های موجود در لایه‌های زیرین هستند. سرعت گسترش این ترک‌ها به شرایط آب‌وهوایی و عوامل ترافیکی بستگی دارد. لیتون^۲ در سال ۱۹۸۹ اظهار داشت هنگامی که یک بار از روی یک ترک موجود در روسازی قدیمی عبور می‌کند، سه پالس تمرکز تنش در نوک ترک ایجاد می‌شود که به سمت سطح لایه روکش گسترش می‌یابد (شکل ۲-۱). این پالس‌های تنش در مدت زمان بسیار کوتاهی ایجاد می‌شوند. اولین پالس تنش، تنش برشی ماکزیمم و دومین پالس، تنش خمشی ماکزیمم و سومین پالس، تنش برشی ماکزیمم است. با این تفاوت که در جهت مخالف پالس برشی اول می‌باشد. تنش برشی ماکزیمم هنگامی که بار در نقطه‌ی C قرار می‌گیرد، بیشتر از زمانی است که بار در نقطه‌ی A قرار می‌گیرد. علت این امر آن است که زیر سطح روسازی قدیمی فضای خالی وجود دارد. حرکت هر روسازی از زیاد شدن ناچیز طول ترک در روکش نتیجه می‌شود. با افزایش تعداد دفعات بارگذاری، مقدار حرکت نیز زیاد شده و در نتیجه نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد و در نهایت ترک‌های انعکاسی در سطح روسازی پدیدار می‌شوند. [۱]

^۱ Reflection Cracking

^۲ Lytton



شکل (۱-۲) تنش‌های ناشی از بار چرخ [۱]

همانطور که گفته شد، نمی‌توان به طور کامل رشد و انتشار ترک‌های انعکاسی را متوقف کرد و فقط میتوان روند رشد آنها را به تعویق انداخت، که یکی از این روش‌ها استفاده از لایه‌میانی مستهلک کننده ترک است.

۲-۵- لایه‌میانی مستهلک کننده ترک

این میان‌لایه انرژی ناشی از تغییرشکل‌های افقی و قائم را مستهلک نموده و همچنین از نفوذ آب و سایر مواد خورنده به درون روسازی راه جلوگیری می‌کند. طبق تحقیقات انجام شده هنگامی که لایه اساس روسازی به حالت اشباع درآید، مقاومت آن ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در این روش یک لایه‌ی مستهلک کننده ترک بین لایه‌روکش و لایه روسازی ترک‌خورده زیرین قرار می‌گیرد که وظیفه‌ی جلوگیری از انتشار و گسترش ترک‌ها از لایه‌های زیرین به لایه‌های بالایی را بر عهده دارد.

۲-۶- انواع میان‌لایه‌های مستهلک کننده ترک

میان‌لایه‌هایی که تاکنون به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از:

- میان‌لایه ماسه آسفالت (آسفالت ریزدانه)
- میان‌لایه کامپوزیت

- میان لایه‌های ژئوسنتتیکی
- میان لایه آسفالتی با قیر اصلاح شده (قیر پلیمری)
- میان لایه ترکیبی با استفاده از الیاف و قیر

۲-۶-۱- میان لایه ماسه آسفالت^۱

این میان لایه یک لایه آسفالتی با دانه‌بندی ریز است. برای تهیه این مخلوط آسفالتی از مصالح سنگی که سایز بزرگترین سنگدانه آن حداکثر ۹/۵ میلی‌متر است، استفاده می‌شود که با مقادیر زیادی قیر مخلوط می‌شوند. دانه‌بندی ریز و مقادیر زیاد قیر به کاررفته در این نوع مخلوط آسفالتی باعث می‌شود که این میان لایه در برابر نفوذ آب مقاومت بالایی داشته و در مقابل بارگذاری‌ها متناوب از خود عملکردی قابل قبولی نشان دهد. این میان لایه تمرکز تنش در مرکز ترک را کاهش داده که موجب افزایش زمان رسیدن ترک به سطح روسازی می‌شود. به علاوه این میان لایه به دلیل وجود مقادیر زیاد قیر و فیلر پیوند بسیار خوبی با لایه‌های روسازی برقرار می‌کند. نتایج بررسی‌های محققان نشان می‌دهد که استفاده از این میان لایه رشد ترک‌های انعکاسی را ۲ سال به تعویق می‌اندازد [۲]. با توجه به عملکرد خاص این میان لایه‌ها باید از مقادیر بالای قیر در آن‌ها استفاده شود. نتایج مطالعات و تحقیقات پیشین نشان می‌دهند که مقدار درصد قیر بهینه برای این میان لایه‌ها بین ۷/۵ تا ۱۰ درصد است. طبق آزمایشات و تحقیقاتی که یانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ انجام دادند، مقدار قیر بهینه در آسفالت ماسه‌ای، ۸/۲ درصد بود [۲].

همچنین این میان لایه‌های ماسه آسفالتی را با قیر اصلاح شده با پودر لاستیک نیز تهیه می‌کنند، که نتایج آزمایشات محققان نیز نشان می‌دهد که استفاده از قیر لاستیکی در میان لایه ماسه آسفالتی مزیت‌هایی همچون: مقاومت در برابر ترک خوردگی، کاهش صدای ناشی از عبور ترافیک می‌باشد. [۳-۷] اما با این وجود یکی از مهمترین معایب استفاده از ماسه آسفالت مقدار بالای شیارشدگی به دلیل وجود مقادیر زیاد قیر و مصالح ریزدانه در آن است [۸]. علاوه بر این از نظر اقتصادی نیز در بین میان لایه‌های مختلف، میان لایه ماسه آسفالت به دلیل استفاده از قیر به مقدار زیاد، بیشترین هزینه را دارا می‌باشد.

^۱ Sand Asphalt

۲-۶-۲- میان لایه کامپوزیت^۱

این میان لایه‌ها متشکل از سه لایه هستند. بر اساس استانداردهای ASTM D 4595 و AASHTO M 288-92 لایه بالایی از ژئوتکستایل بافته شده، لایه میانی از قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و لایه پایینی از ژئوتکستایل بافته نشده با مقاومت بالا تشکیل شده است. مقاومت لایه بالایی ۴۰۰۰ پوند بر اینچ می‌باشد. هنگامی که این میان لایه در برابر تنش‌های ناشی از جابجایی روسازی قرار می‌گیرد، لایه فوقانی این میان لایه به دلیل قابلیت بازتر شدن تنش‌های وارده را مستهلک می‌کند. لایه میانی که از قیر لاستیکی تهیه شده نیز وظیفه اتصال دو لایه بالایی و پایینی را بر عهده دارد. [۹]

نتایج بررسی‌های محققان نشان می‌دهد که این مابین لایه نیز اگرچه رشد ترک‌های انعکاسی را به تعویق می‌اندازد ولی مقاومت کمتری در برابر خستگی از خود نشان می‌دهد. هزینه هر فوت میان لایه کامپوزیتی حدود ۱۰ الی ۱۴ دلار است. [۱۰]

۲-۶-۳- میان لایه‌های ژئوسنتتیک

ژئوسنتتیک‌ها یا پارچه‌گونه‌ها محصولات مسطحی هستند که طبق تعریف ASTM از مواد پلیمری ساخته شده و در پروژه‌های مهندسی عمران به همراه خاک، سنگ و یا سایر مصالح مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱۱]

ژئوسنتتیک‌ها به پنج دسته ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها، ژئونت‌ها، ژئوممبرین‌ها، ژئوکامپوزیت‌ها تقسیم می‌شوند. اما برای تقویت روسازی‌های آسفالتی و به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی از ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و ژئوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. [۱۲]

ژئوتکستایل‌ها بزرگ‌ترین گروه ژئوسنتتیک‌ها را تشکیل می‌دهند. این محصولات، منسوجات متخلخل و نفوذپذیری هستند که از الیاف پلیمری ساخته می‌شوند.

ژئوگریدها گروهی دیگر از خانواده ژئوسنتتیک‌ها از جنس پلی‌استر و پلی‌اتیلن یا ترکیبی از این مواد هستند. این محصولات در ضخامت، اندازه و ابعاد مختلف تولید می‌شوند. ژئوگریدها مصالح پلیمری شبکه‌ای هستند که شامل نوارهای باریک کششی موازی به هم متصل شده می‌باشند.

ژئوکامپوزیت‌ها ترکیب دو یا چندتایی از ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها، ژئونت‌ها یا ژئوممبرین‌ها

^۱ Interlayer Stress Absorbing Composite (ISAC)

هستند. در ساخت ژئوکامپوزیت ها ممکن است محصولات غیر پلیمری و رشته های فولادی برای افزایش مقاومت کششی و یا ماسه جهت ایجاد مقاومت فشاری استفاده شود.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل (۲-۲) محصولات ژئوسنتتیکی: الف: ژئوتکستایل ب: ژئوگرید ج: ژئوکامپوزیت

یکی از نکات مهمی که در استفاده از میان لایه های ژئوسنتتیکی باید رعایت شود آن است که در شرایط آب و هوایی گرم هنگامی که از ژئوسنتتیک ها در روسازی استفاده می شود نباید ضخامت روکش کمتر از ۵۰ میلی متر باشد. بر اساس تحقیقاتی که در اداره حمل و نقل تگزاس انجام شده است، ژئوسنتتیک ها جایگزین ضخامت سازه ای روسازی نیستند و نباید هنگام استفاده از آن ها ضخامت روکش کاهش یابد.

۲-۶-۴- میان لایه آسفالتی با قیر پلیمری

این میان لایه از یک مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلیمر ساخته می شود. سنگدانه های به کار رفته در آن دانه بندی ریزتری دارند. این میان لایه نیز رشد و انتشار ترک های انعکاسی را ۲ سال به تعویق می اندازد.

۲-۶-۵- میان لایه های ساخته شده از الیاف و قیر

یکی از این میان لایه ها فایبرمت^۱ می باشد. نحوه ی ساخت و اجرای این لایه بدین صورت است که ابتدا لایه ای از قیر امولسیون بر روی روسازی موجود ریخته شده و سپس الیاف فایبر گلاس بر روی آن

^۱ Fiber Mat

قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعد مجدداً بر روی این الیاف قیر امولسیون ریخته می‌شود. در نهایت با لایه‌ای از سنگدانه روی آن را پوشش می‌دهند. یک از تفاوت‌های این لایه با سایر میان‌لایه‌ها این است که می‌توان از آن در کوتاه مدت به عنوان لایه روکش برای روسازی‌های موجود استفاده کرد ولی در طولانی مدت باید با لایه روکش آسفالتی پوشانده شود. [۱۳]

۲-۷- مروری بر مطالعات گذشته

پژوهشگران متعددی به شکل عددی، تحلیلی، آزمایشگاهی و اجرا در محل (بررسی میدانی) به بررسی نقش و تأثیر میان‌لایه‌ها پرداخته‌اند، لذا در این بخش سعی شده است نتایج تحقیق افراد مختلف در این زمینه بیان گردد.

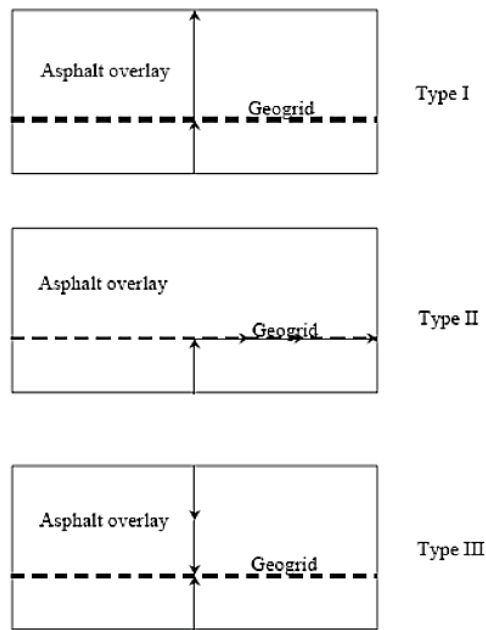
لیتون [۱] در سال ۱۹۸۹ در پروژه‌ای آزمایشگاهی با استفاده از آزمون خمش چهارنقطه‌ای سه نوع ترک خوردگی در لایه روکش را مطالعه و بررسی کرد. او در نمونه‌های خود ژئوتکستایل‌ها را در ۲ سانتی‌متری از کف نمونه قرار داد. بارگذاری تا زمان شکل‌گیری ترک در تمام مقطع ادامه داشت. او برای شکست نمونه‌ها سه حالت مشاهده کرد که در شکل ۲-۳ نشان داده شده‌اند.

- نفوذ ترک به سمت بالای نمونه (Type I)
- رسیدن ترک از کف نمونه به ژئوتکستایل و در نهایت انتشار در طول نمونه (Type II)
- رسیدن ترک‌ها به هم در محل قرارگیری ژئوتکستایل (Type III)

حالت اول و سوم هنگامی که ژئوتکستایل به عنوان آزادسازی کرنش^۱ عمل می‌کند و حالت دوم نیز وقتی که عمل تقویت کردن^۲ در روکش را دارد، رخ می‌دهد. این حالت زمانی که مدول الاستیسیته ژئوتکستایل زیاد باشد، اتفاق می‌افتد. در حالت آزادسازی کرنش، ترک‌های جدید از روی ترک‌های قدیمی موجود در روسازی زیرین شروع شده و به سمت کف ژئوتکستایل رشد می‌کنند. در نهایت با تکرار بارترافیکی و تنش‌های حرارتی به سمت سطح لایه روکش انتشار می‌یابند، تا جایی که انرژی کافی برای گسترش بیشتر ترک وجود نداشته باشد.

^۱ Strain-Relieving

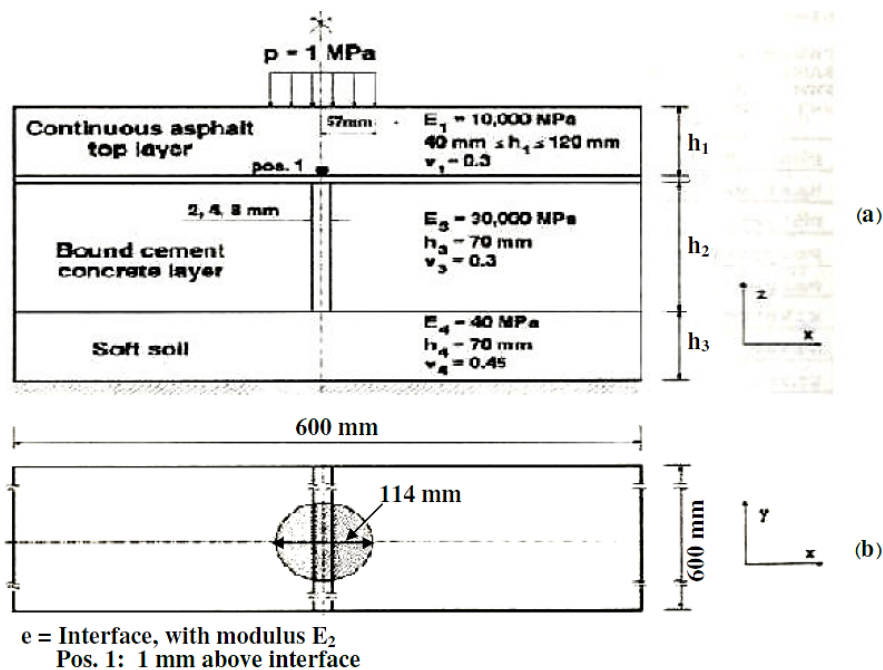
^۲ Reinforce



شکل (۲-۳) حالات ایجاد ترک انعکاسی در نمونه‌های حاوی ژئوگرید [۱]

فرانکن و همکارانش در سال ۱۹۹۳ [۱۴] با استفاده از مدل‌سازی عددی (دو بعدی و سه بعدی) اثر مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک را بر افزایش زمان شروع ترک‌ها در روکش ارزیابی نمودند. مقطع روسازی بررسی شده توسط آن‌ها در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که:

- استفاده از سیستم‌های تقویت‌کننده با مدول الاستیسیته‌ی بالا باعث تأخیر در ایجاد ترک گردید، اما استفاده از تقویت‌کننده‌های نرم باعث کاهش کرنش ایجاد شده در نوک ترک شده، ولی در فواصل دورتر از نوک ترک باعث افزایش کرنش‌ها شده بود.
- مقادیر کرنش آنالیز سه بعدی کمتر از جواب‌های حاصل از آنالیز سه بعدی بود.
- در آنالیز دو بعدی مقدار کرنش با افزایش فاصله از کف کاهش یافته، اما در آنالیز سه بعدی کاهش کرنش در نواحی نوک ترک ایجاد شده و ماکزیمم کرنش در ناحیه ۵ سانتی‌متر از نوک ترک بوده است که در این ناحیه احتمال شروع شدن ترک‌ها مهم تلقی می‌شد.
- چسبندگی خوب بین لایه‌های روکش، ژئوسنتتیک و روسازی قدیمی، باعث بهبود عملکرد ژئوسنتتیک‌ها شد و همچنین زمان رشد و انتشار ترک‌ها را به تعویق انداخت.



شکل (۲-۴) مقطع روسازی مدل سازی شده در آنالیز دو بعدی (شکل a) و آنالیز سه بعدی (شکل b) [۱۴]

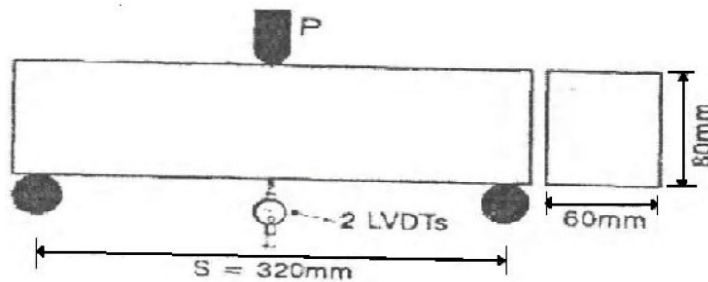
فرانکن و همکاران همچنین در سال ۱۹۹۶ [۱۵] مطالعات عددی و آزمایشگاهی خود را بر روی اثر ژئوسنتتیک‌های بافته شده و تقویت کننده‌های شبکه‌ای فلزی در به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی انجام دادند. علاوه بر این آن‌ها نقش بارگذاری ترافیکی و درجه حرارت را بر رشد و انتشار ترک‌های انعکاسی ارزیابی نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر بوده است:

- قراردادن میان لایه ژئوسنتتیکی با سختی کم در کف لایه آسفالتی عمر سرویس دهی روسازی در نزدیکی ترک را افزایش می‌دهد، اما در نواحی دورتر از نوک ترک تأثیر منفی دارد و امکان رشد و انتشار ترک در آن نواحی بیشتر است.
- با استفاده از میان لایه‌های ژئوسنتتیکی با ضخامت ۲ میلی‌متر، عمر سرویس دهی لایه روکش ۱٫۸ برابر افزایش یافت.
- چنانچه برای اتصال لایه‌های روسازی قدیمی، میان لایه ژئوسنتتیکی و لایه روکش از قیرهای امولسیون‌ی به جای قیرهای اصلاح شده پلیمری به عنوان اندود سطحی استفاده شود، ترک‌های انعکاسی با سرعت بیشتری رشد کرده و انتشار می‌یابند.

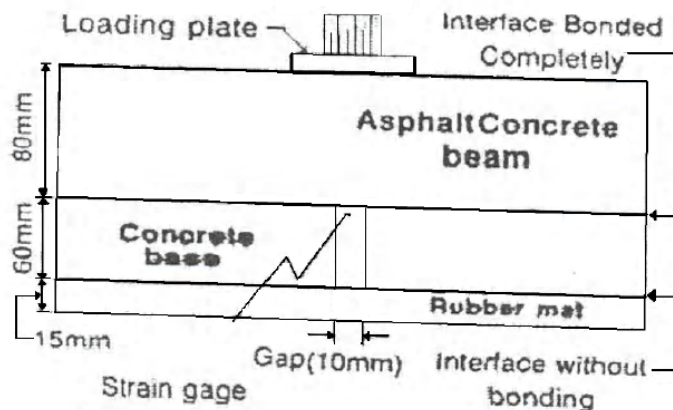
در تحقیق دیگری که در سال ۱۹۹۶ انجام شد، کیم و همکاران^۱ [۱۶] از یک میان لایه پلیمری برای تقویت روسازی آسفالتی استفاده کرده بودند و خصوصیات آن را با آسفالت تهیه شده با قیر پلیمری

^۱ Kim et al

مقایسه نمودند. آنان بدین منظور از آزمون خمش سه نقطه‌ای^۱ و آزمایش انتشار ترک استفاده کردند. سپس با بررسی نتایج به این نتیجه رسیدند که استفاده از یک میان‌لایه پلیمری باعث تقویت و بهبود مقاومت خمشی و کششی نمونه‌ها می‌شود. همچنین این میان‌لایه پلیمری در مقایسه با روکش آسفالتی تهیه شده با قیر پلیمری عملکرد بهتری در برابر گسترش ترک‌ها داشت.



شکل (۲-۵) شکل شماتیک آزمون خمش سه نقطه‌ای [۱۶]



شکل (۲-۶) شکل شماتیک آزمون انتشار ترک [۱۶]

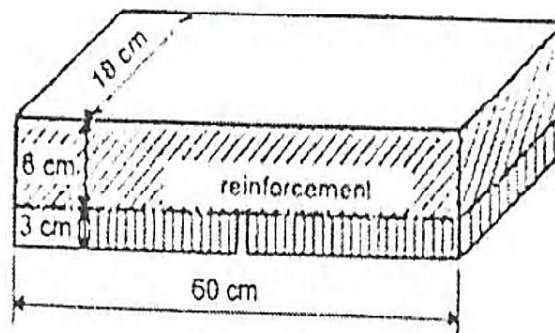
در تحقیقی دیگر جکلین و همکاران [۱۷] در سال ۱۹۹۶ با استفاده از آزمون خمش چهارنقطه-ای^۲ به بررسی اثر ژئوگریدهای الیاف شیشه^۳ بر رشد و انتشار ترک‌های انعکاسی پرداختند. نمونه‌های آن‌ها دال‌های آسفالتی با ابعاد $600 \text{ mm}^L \times 80 \text{ mm}^W \times 90 \text{ mm}^H$ بود. بارگذاری دینامیکی، ماکزیمم نیرو ۴٫۵ کیلونیوتن با فرکانس ۲٫۳ هرتز و دمای آزمایش ۵ درجه سانتی‌گراد بود.

^۱ Three Point Bending Test

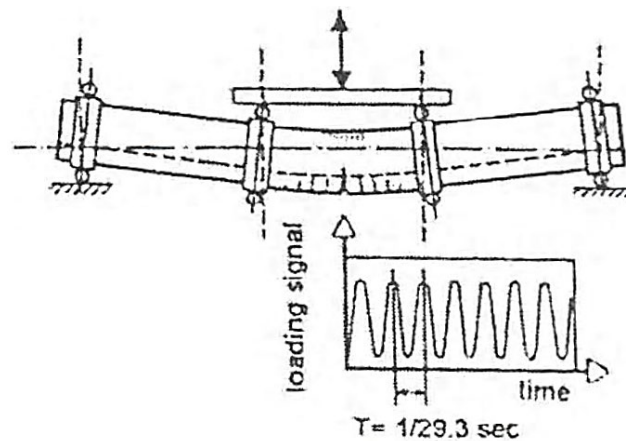
^۲ Four Point Bending Test

^۳ Glass Fiber Geogrid

آن‌ها میان‌لایه‌ها را در فاصله‌ی ۳۰ سانتی‌متری از کف نمونه بر روی درز ۲۵ میلی‌متر قرار داده بودند. آزمایش برای ژئوگریدهای الیاف شیشه با پروپیلن بافته شده، ژئوگرید پلی‌استر و ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن بافته نشده انجام شد. آن‌ها پس از انجام آزمایشات خود و تحلیل نتایج اظهار داشتند که استفاده از Glass Phat شامل Glass Fiber Grid و Nonwoven Geotextile باعث افزایش عمر ۷ تا ۸ برابری نسبت به حالت بدون میان‌لایه گردید. در حالی که استفاده از ژئوگریدهای پلی‌پروپیلنی و یا پلی‌استری باعث افزایش ۳ تا ۴ برابری نسبت به نمونه‌های کنترلی گردید.

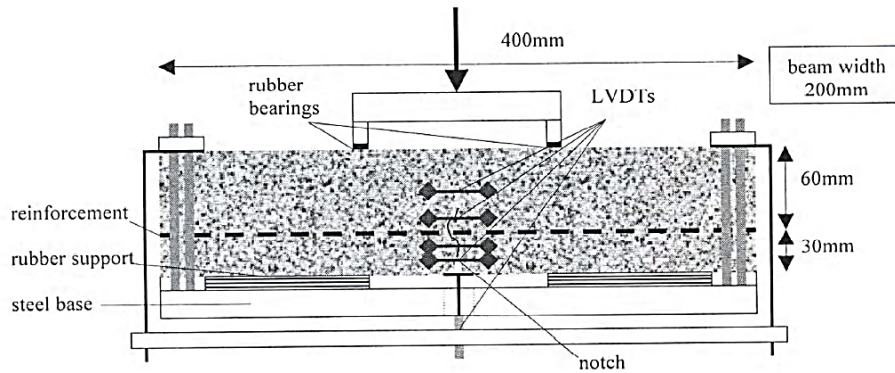


شکل (۷-۲) شماتیکی از نمونه‌های آزمایش [۱۷]



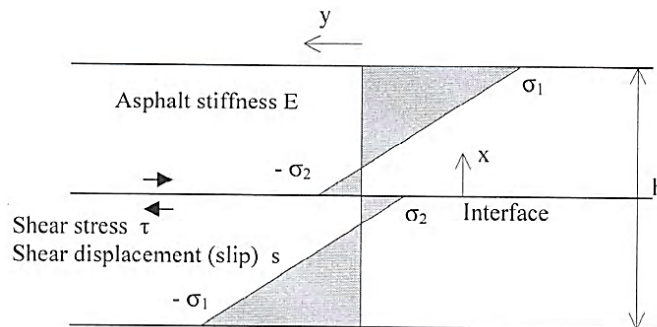
شکل (۸-۲) شماتیکی از نمونه‌های آزمایش تحت بارگذاری چهارنقطه‌ای [۱۷]

آقای برون و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۰۱ تأثیر انواع میان‌لایه‌ها بر روی خصوصیات خستگی آسفالت را با استفاده از آزمون‌های خمشی و برشی ارزیابی کردند. در شکل ۹-۲ شماتیکی از نمونه‌های آزمایشگاهی آن‌ها تحت خمش چهارنقطه‌ای نشان داده شده است.



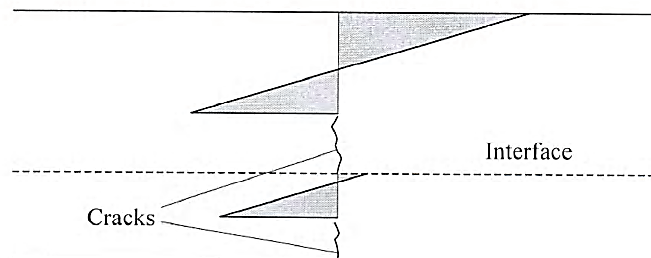
شکل (۹-۲) شکل شماتیک نمونه‌های آزمایشگاهی تحت آزمون خمش چهارنقطه‌ای [۱۸]

بر اساس مطالعات آنان توزیع تنش‌ها، با توجه به مدول میان‌لایه و چسبندگی آن با لایه‌های روسازی (لایه روکش و لایه روسازی قدیمی)، طبق شکل ۲-۱۰ بوده است. تنش برشی در میان‌لایه باید با نیروهای افقی در بالا و پایین تار خنثی به تعادل برسد.



شکل (۲-۱۰) توزیع تنش‌ها در نمونه دارای میان‌لایه [۱۸]

تنش کششی می‌تواند در میان‌لایه ایجاد گردد و مقدار آن به لغزش میان‌لایه بر روی سطح آسفالت بستگی دارد. بدین ترتیب امکان گسترش ترک از میان‌لایه طبق شکل ۲-۱۱ وجود دارد.

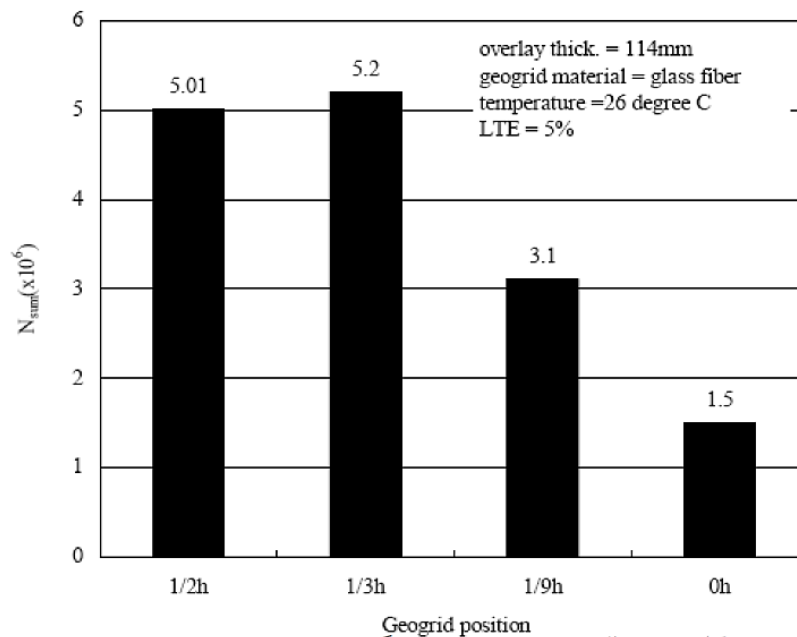


شکل (۲-۱۱) توزیع تنش فرض شده با توجه به رشد و انتشار ترک از کف نمونه و میان-لایه [۱۸]

آن‌ها همچنین دریافته‌اند که مقاومت چسبندگی بین میان‌لایه و لایه‌های آسفالت به عنوان یک فاکتور مهم در عملکرد میان‌لایه به حساب می‌آید و مقاومت چسبندگی زیاد، که با استفاده از شبکه‌های پلیمری با نوارهای مقطع زیاد بدست می‌آید، تأثیر خوبی در تقویت لایه آسفالتی دارد.

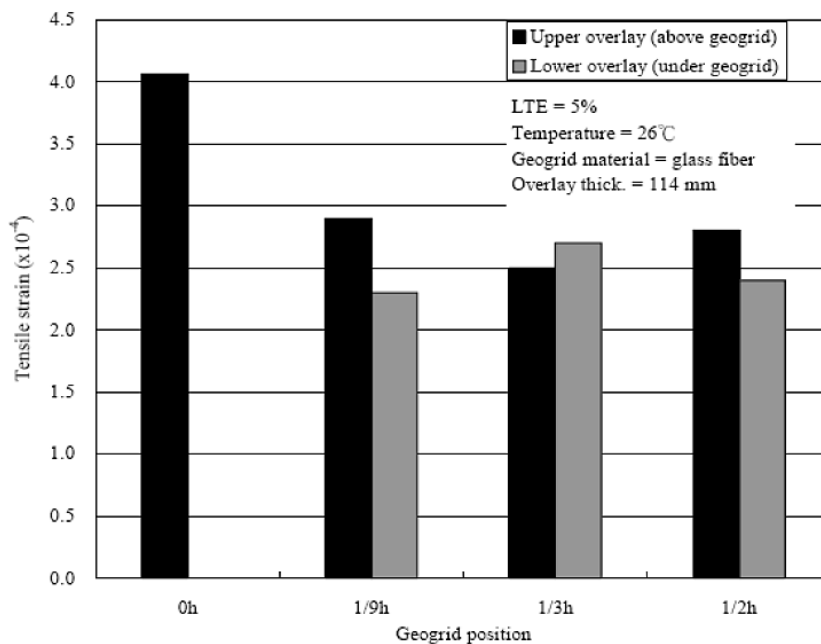
آقایان Hso و Kuo [۱۹] در سال ۲۰۰۳ با استفاده از تحلیل المان محدود بر اساس مدل سه بعدی به کمک نرم‌افزار آباکوس، تأثیر محل قرارگیری ژئوگریدها را در به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی ارزیابی نمودند. نتایج تحلیل‌های آنان نشان داد که بهترین عملکرد ژئوگریدها هنگامی بود که در $\frac{1}{3}$ ضخامت روکش از کف لایه روکش قرار داشت (شکل ۲-۱۲).

همانطور که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است، قرارگیری ژئوگرید در این محل انرژی تغییرشکل را به دو لایه توزیع کرده و سطح کرنش را کاهش می‌دهد. علاوه بر این باعث تقسیم لایه روکش به دو لایه بالایی و پایینی شده که لایه پایینی به عنوان لایه سطحی^۱ باعث نشست و چسبندگی خوب ژئوگرید می‌شود.



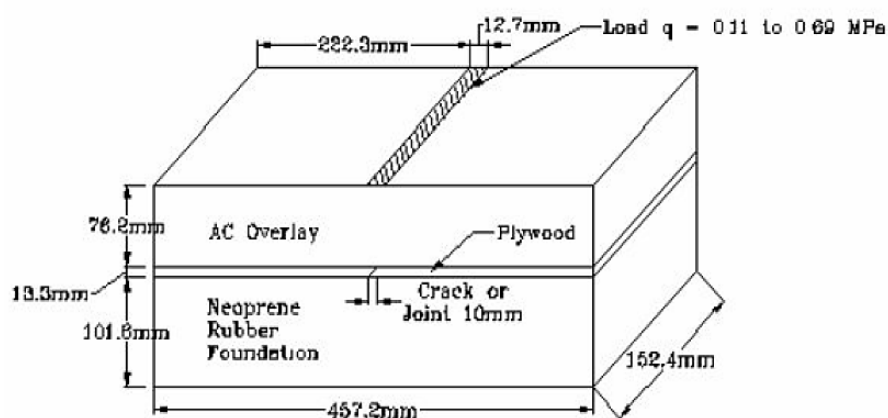
شکل (۲-۱۲) عمر خستگی نمونه‌های تقویت شده با ژئوگرید [۱۹]

^۱ Leveling Layer



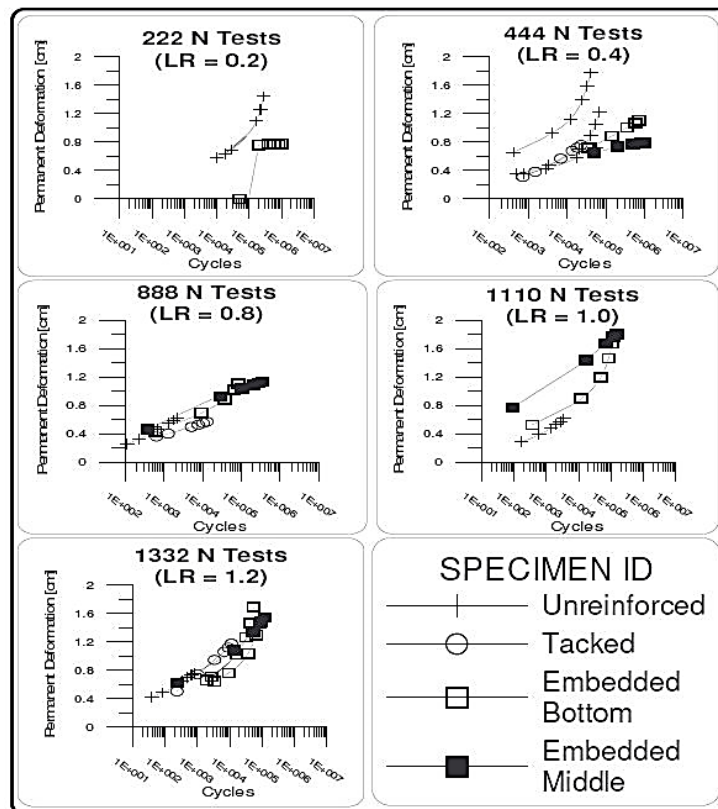
شکل (۲-۱۳) کرنش کششی در نمونه‌های تقویت شده با ژئوگرید [۱۹]

در سال ۲۰۰۵، سبحان و همکارانش [۲۰] به منظور تقویت روسازی‌های آسفالتی، به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی و کنترل گسترش این ترک‌ها مطالعاتی را انجام دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که بهترین محل قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها در کاهش نرخ رشد ترک‌های انعکاسی در وسط لایه روکش بوده است. آنان نمونه‌های خود را در ابعاد $457.2 \text{ mm}^L \times 152.4 \text{ mm}^W \times 76.2 \text{ mm}^H$ تهیه کرده و برای شبیه سازی بستر، نمونه‌ها را بر روی یک لایه لاستیکی به ضخامت $10.1/8$ میلی‌متر قرار دادند.



شکل (۲-۱۴) شکل شماتیک نمونه دال آسفالتی [۲۰]

بار دینامیکی به اندازه ۲۲۲، ۴۴۴، ۸۸۸ و ۱۱۱۰ نیوتن با فرکانس ۲ هرتز به صورت سینوسی به نمونه‌های آسفالتی وارد شد. آن‌ها با استفاده از کرنش‌سنج و دوربین دیجیتال، تغییر شکل قائم نمونه و گسترش ترک‌ها تا سطح لایه روکش را بررسی نمودند. در شکل ۲-۱۵ نیز نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۵) تغییر شکل دائمی نمونه‌ها نسبت به عمر خستگی آن‌ها در نسبت بارگذاری مختلف [۲۰]

آن‌ها پس از تحلیل نتایج خود دریافتند که نمونه‌های حاوی میان‌لایه در وسط لایه آسفالتی دارای زمان بارگذاری بیشتر و تغییر شکل کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر بودند و با افزایش مقدار بارگذاری، نمونه‌های حاوی میان‌لایه در وسط لایه آسفالتی دارای خیز بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر شده بودند، اما با این وجود، تعداد سیکل بارگذاری بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها نیاز بود تا ترک در این نمونه‌ها به سطح لایه روکش برسد.

در این تحقیق، نوع روسازی زیرین به طور دقیق مدل نشده و در نتیجه نسبت مقاومت نمونه‌های دارای میان‌لایه در مقابل ترک انعکاسی به نمونه‌های کنترلی و جهت ترک‌خوردگی در لایه روکش ارائه نشده است.

فلاح و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۹ [۲۱] اثر ژئوسنتتیک‌ها را در کاهش ترک‌های انعکاسی در روکش‌های آسفالتی بررسی کردند. هدف آن‌ها ارزیابی تأثیر استفاده از ژئوگرید و محل قرارگیری آن در لایه‌ی روکش بر روی تغییر شکل‌های دائمی (شیارشده‌گی) و ترک‌های انعکاسی بود. آنان برای بررسی مود I ترک‌خوردگی یعنی مود بازشوندگی، بر نمونه‌های آسفالتی ساخته شده بار دینامیکی را توسط دستگاه یونیورسال^۱ که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است، اعمال کردند.

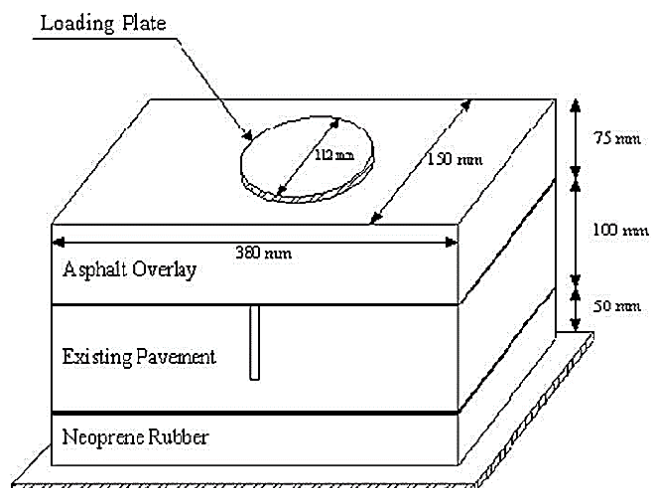


شکل (۲-۱۶) دستگاه آزمایش (UTM-25) [۲۱]

ابعاد نمونه‌های ساخته شده توسط آن‌ها در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. لایه روکش و روسازی موجود با ابعاد نشان داده شده بود و یک لاستیک نئوپرن نیز برای شبیه‌سازی بستر ارتجاعی در زیر نمونه قرار داده شد. چهار نوع نمونه در این آزمایش تهیه گردید:

- نمونه‌های کنترل که بدون ژئوگرید بودند.
- نمونه‌هایی که ژئوگرید روی بلوک بتنی و آسفالتی یعنی کف لایه روکش قرار داده شده بود.
- نمونه‌هایی که ژئوگرید در آنها در یک سوم ضخامت روکش از پایین قرار داشت.
- نمونه‌هایی که ژئوگرید آنها در وسط لایه روکش آسفالتی قرار گرفته بود.

^۱ Servo-Hydraulic Dynamic Testing Machine



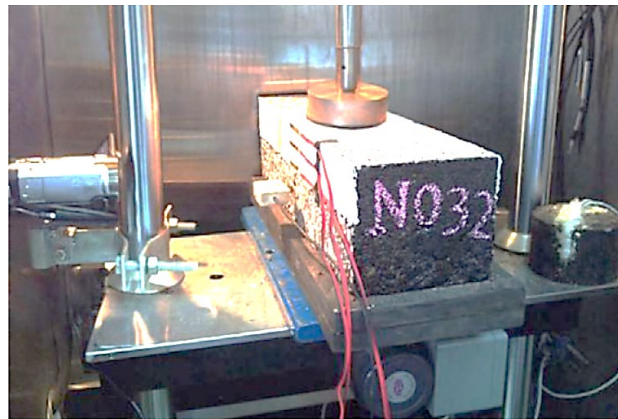
شکل (۲-۱۷) شکل شماتیک نمونه دال آسفالتی [۲۱]

نمونه‌ها در دو دمای ۲۰ و ۶۰ درجه آزمایش شدند. برای آزمایش در هر دما نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در محفظه دما با همان دمای مورد نظر نگهداری شدند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که وقتی میان لایه ژئوسنتتیکی در وسط یا یک‌سوم پایینی لایه روکش باشد این کار لایه روکش را به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌کند؛ این طراحی از آن جهت بهینه است که بخش پایینی لایه روکش به عنوان لایه‌ی تسطیح‌کننده عمل کرده و جانمایی و چسبندگی لایه روکش را با لایه‌های روسازی تضمین می‌کند. همچنین آن‌ها دریافتند که تأثیر ژئوگرید با افزایش عرض ترک (۱۰ به ۲۰ میلی متر) کاهش نمی‌یابد، اما با افزایش دما (۲۰ به ۶۰ درجه) تأثیر ژئوگرید کاهش می‌یابد.

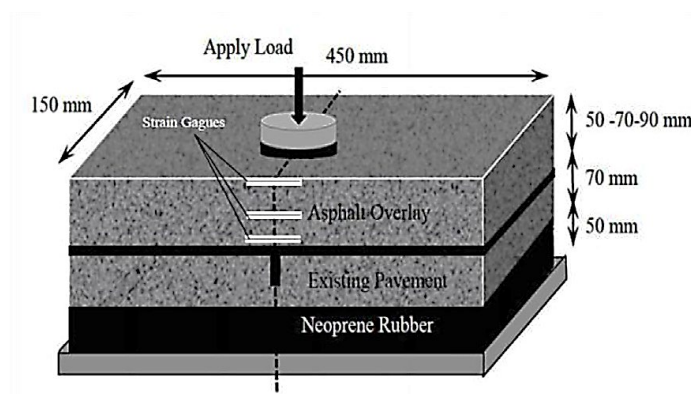
فلاح و همکاران در پروژه‌ای دیگر [۲۲] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثرات مسلح کردن و تقویت کردن لایه روکش با ژئوگرید پرداختند. اما این بار تأثیر پارامترهای زیر را بر روی عملکرد روکش آسفالتی تقویت شده با میان لایه ژئوسنتتیکی (ژئوگرید) ارزیابی کردند:

- سختی ژئوگرید
- مقاومت کششی
- نوع اندود سطحی
- میزان اندود سطحی
- ضخامت روکش
- عرض ترک
- سختی روکش آسفالتی

آن‌ها بار دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی را با استفاده از دستگاه یونیورسال^۱ اعمال نمودند (شکل ۲-۱۸). مدل آزمایش آن‌ها شامل روکش آسفالتی با ابعاد داده شده در شکل ۲-۱۹ و با ضخامت های ۵۰ و ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر و مدول سختی‌های متفاوت بود (سختی‌های مختلف را با به کارگیری دانه‌بندی‌های مختلف نشریه ۲۳۴ برای لایه روکش اعمال کردند). بلوک‌های آسفالتی با مدول سختی‌های مختلف برای شبیه‌سازی روسازی زیرین ساخته شد، که سختی‌های مختلف را با به کارگیری دانه‌بندی‌های مختلف نشریه ۲۳۴ برای لایه روسازی زیرین اعمال کرده بودند. ضخامت لایه روسازی زیرین ۷۰ میلی‌متر بود و سه عرض مختلف ۳ و ۶ و ۹ میلی‌متر برای ترک‌ها موجود در روسازی زیرین در نظر گرفتند و یک بستر ارتجاعی که با لاستیک نئوپرنی تهیه شده بود در زیر نمونه‌ها قرار دادند.



شکل (۲-۱۸) نمونه دال آسفالتی تحت آزمایش بارگذاری دینامیکی دستگاه UTM [۲۲]



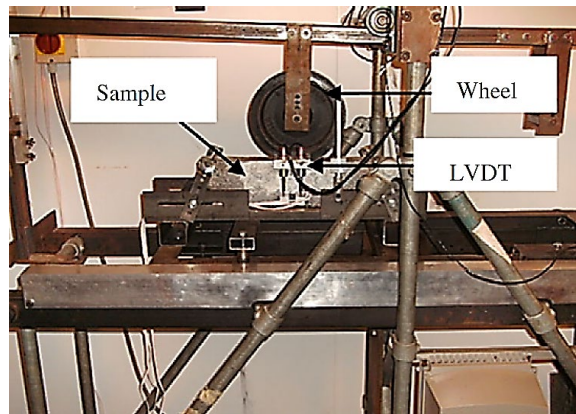
شکل (۲-۱۹) شماتیک نمونه دال آسفالتی [۲۲]

^۱ Universal Testing Machine (UTM)

آنان با بررسی نتایج آزمایش دریافتند که:

- مدول لایه ترک خورده (روسازی زیرین) بیشترین تأثیر را بر کرنش اولیه در پایین لایه روکش دارد.
- پارامتری که رتبه دوم را از نظر تأثیر بر کرنش اولیه دارد سختی لایه روکش است.
- ضخامت لایه روکش، رتبه سوم را از نظر تأثیر بر کرنش اولیه در پایین لایه روکش تقویت شده دارد.
- در نهایت عرض ترک، مقاومت کششی ژئوگرید، نوع ژئوگرید به کاررفته، میزان اندود سطحی و نوع اندود سطحی به ترتیب بیشترین اثر را بر کرنش اولیه دارند (کمترین تأثیر مربوط به نوع اندود سطحی)

آن‌ها همچنین اظهار داشتند که در روکش‌های تقویت شده عموماً تأثیر شبکه شیشه‌ای^۱ در کاهش کرنش اولیه در پایین لایه روکش بیش از شبکه پلی‌استر^۲ است. اگاندیپ^۳ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۳ به بررسی پتانسیل مقاومت ترک خوردگی در میان لایه‌های غشایی جذب‌کننده‌ی تنش^۴ (SAMI) تحت بارگذاری ترافیکی پرداختند. آن‌ها به منظور شبیه‌سازی دقیق تنش‌ها و کرنش‌ها از دستگاه آزمایش عبور چرخ^۵ که در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است، استفاده کردند.



شکل (۲-۲۰) دستگاه آزمایش عبور چرخ (Wheel Track) [۲۳]

^۱ Glass Grid

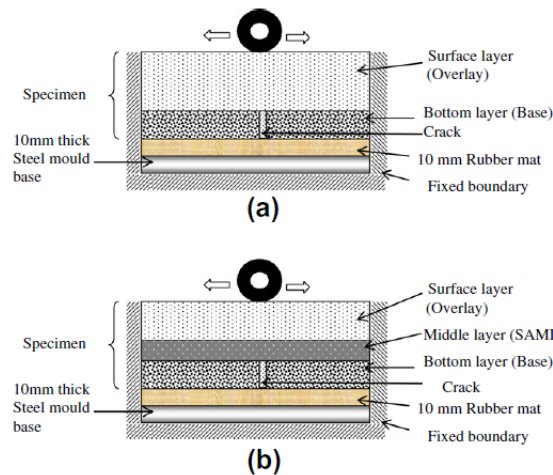
^۲ Polyester Grid

^۳ Ogundipe

^۴ Stress absorbing Membrane Interlayer (SAMI)

^۵ Wheel Track

برای مطالعه‌ی اثرات دما بر روی SAMI ها، دستگاه آزمایش درون یک اتاق با دمای مشخص قرارداداده شد. یک بستر لاستیکی هم در کف نمونه‌ها قرار داده شد.



شکل (۲-۲۱) شماتیکی از نمونه‌های آزمایش: بدون میان‌لایه جاذب تنش (a)، دارای میان‌لایه جاذب تنش (b)

لایه‌میانی شامل آسفالت ماسه‌ای^۱ بود. به علاوه، مخلوط اختصاصی دیگر به نام‌های SAMI A و SAMI B تهیه شد که مشخصات آن‌ها ذکر نشده است. نمونه‌های آزمایش تیرهای ۲ یا ۳ لایه‌ای به طول ۴۰۴ و عرض ۵۰ میلی‌متر بودند. لایه‌ی زیرین ۳۰ میلی‌متر ضخامت داشت و ضخامت لایه میانی هم ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بود. ضخامت لایه روکش هم از ۴۰ تا ۸۰ میلی‌متر انتخاب گردید. آن‌ها پس از بررسی و انجام آزمایشات دریافتند که: میان‌لایه‌های SAMI A و SAMI B توانستند ترک خوردگی انعکاسی را در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به تعویق می‌اندازند، اما در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نسبتاً بی‌اثر هستند. آسفالت ماسه‌ای در به تعویق انداختن ترک خوردگی انعکاسی غالباً ناکارآمد بود، که احتمالاً ناشی از سختی بسیار کم آن بوده است.

آن‌ان همچنین اظهار داشتند که یک سختی بهینه وجود دارد که در آن SAMI ها در جلوگیری و به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی مؤثر هستند. ضخامت SAMI بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. مقاومت SAMI ها در برابر ترک‌های انعکاسی وقتی که بار ۱.۳۵ KN (فشار لاستیک ۰.۶ MPa) به روسازی وارد شد نسبت به بار ۲.۴ KN (فشار لاستیک ۱.۱ MPa) واضح تر و بیشتر بود، این موضوع نشان می‌دهد هنگامی که بارهایی با مقادیر زیاد به روسازی وارد می‌شود مانند روسازی فرودگاه، استفاده از یک میان‌لایه تقویت شده بهتر است. عملکرد SAMI ها تحت تأثیر دما است. یعنی هم آسفالت ماسه‌ای

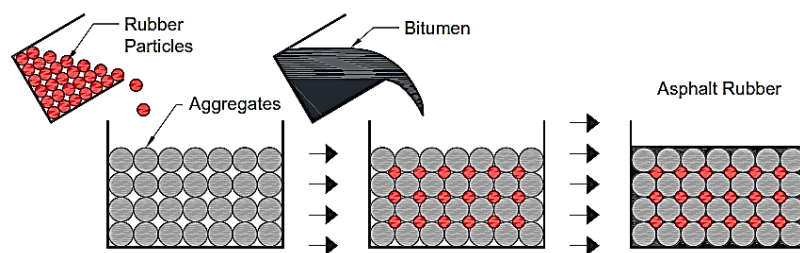
^۱ Sand Asphalt

و هم مخلوط‌های اختصاصی SAMI A و SAMI B بیشترین تأثیر را در ۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد داشتند که بهترین عملکرد آن‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. مزیت نسبی SAMI‌ها با افزایش ضخامت روکش کاهش می‌یابد همچنین استفاده از SAMI در لایه‌روکش بالای روسازی-ترک‌خورده منجر به افزایش تغییر شکل‌ها می‌شود، با این حال SAMI‌ها قادر به کندساختن روند ترک-خوردگی انعکاسی بودند.

سیلوا^۱ و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۷ به بررسی و ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی با افزودن درصد بالایی از ذرات بسیار ریز لاستیک (طی فرایند خشک) پرداختند.

آنان در پروژه خود از مصالح سنگی گرانیتهی که ذرات آن دارای شکل خوبی هستند و چسبندگی خوبی با قیر دارند، فیلر سنگ آهک و از فرآیند خشک برای تهیه آسفالت لاستیکی استفاده کردند. مقدار خرده لاستیک به کار رفته برای تهیه آسفالت لاستیکی ۲۰ درصد وزنی قیر در مخلوط بود. آن‌ها طبق مشخصات مخلوط‌های آسفالتی که در مارشال بیان شده درصد قیر در آسفالت لاستیکی را ۸ درصد و در آسفالت معمولی ۵ درصد در نظر گرفتند.

به منظور تهیهی آسفالت لاستیکی ابتدا خرده لاستیک را با مصالح سنگی گرم شده به مدت ۱۵ ثانیه مخلوط کرده و سپس قیر را به آن افزودند. بعد مخلوط را برای اتصال کامل بین قیر و لاستیک که فرآیند هضم^۲ نام دارد، به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۱۶۰ درجه قرار داده و سپس مخلوط را متراکم کردند.



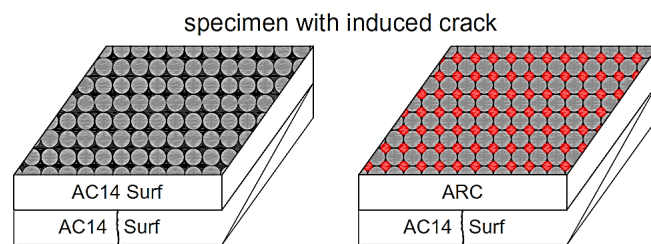
شکل (۲-۲۲) تهیه آسفالت لاستیکی طی فرآیند خشک [۲۵]

آن‌ها یک آزمون بارگذاری سیکلی بر روی نمونه‌های ترک‌خورده با ۵ میلی‌متر عرض ترک و ۱۰ میلی‌متر عمق ترک انجام دادند. نمونه‌های آنان شامل یک لایه زیرین برای شبیه‌سازی روسازی ترک‌خورده قدیمی و یک لایه بالایی برای شبیه‌سازی لایه روکش جدید بود (بدون لایه‌میانی). این نمونه‌ها ۳۰۰ میلی‌متر عرض، ۴۰۰ میلی‌متر طول و ۹۰ میلی‌متر ضخامت داشت (۴۵ میلی‌متر لایه روسازی

^۱ Silva

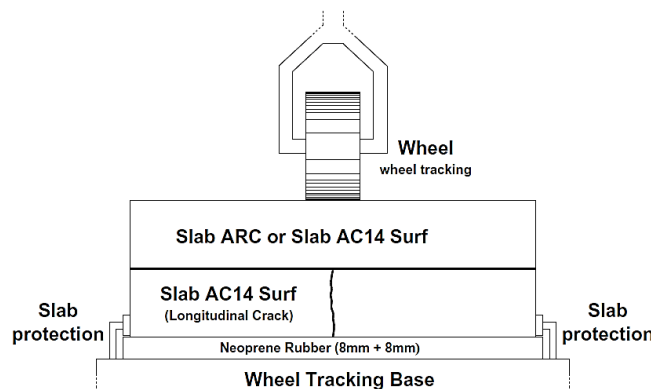
^۲ Digestion

زیرین و ۴۵ میلی‌متر هم لایه‌روکش) که لایه روکش را از آسفالت معمولی و لاستیکی تهیه کرده بودند.



شکل (۲۳-۲) شماتیک نمونه‌های دال آسفالتی [۲۴]

از دستگاه آزمون عبور چرخ^۱ برای بررسی رشد ترک‌های انعکاسی استفاده نمودند. دمای آزمایش هم ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود.



شکل (۲۴-۲) شماتیک نمونه دال آسفالتی تحت آزمون عبور چرخ [۲۴]

آن‌ها آزمایش خود را برای حالات زیر چهار مرتبه تکرار کردند:

- دمای ۲۰ درجه با روکش از جنس آسفالت لاستیکی (ARC)
- دمای ۴۰ درجه با روکش از جنس آسفالت لاستیکی (ARC)
- دمای ۲۰ درجه با روکش از جنس آسفالت معمولی (AC14 Surf)
- دمای ۴۰ درجه با روکش از جنس آسفالت معمولی (AC14 Surf)

آن‌ها پس از انجام آزمایش دریافتند که نمونه‌های روکش شده با ARC عمر خستگی بیشتری (حدود ۱۰ برابر) دارند. همچنین مقاومت نمونه‌های روکش شده با ARC در برابر شیار شدگی یا تغییر شکل‌های دائمی^۲ بیشتر است. علاوه بر این مقاومت روکش ساخته شده با ARC در تابستان (دمای

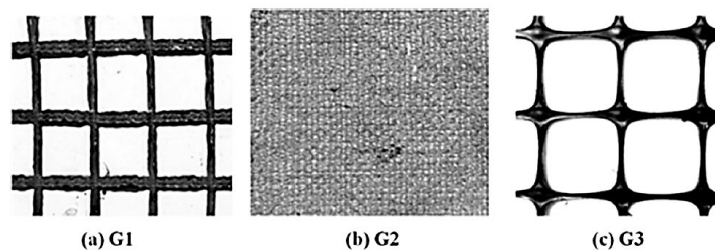
^۱ Wheel Tracking

^۲ Permanent Deformation

۴۰ درجه) خیلی بیشتر (حداقل ۶ برابر بیشتر) از روکش ساخته شده با آسفالت معمولی AC14 Surf است.

سراید^۱ و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۷ به بررسی نقش میان لایه‌های ژئوسنتتیک در به تعویق- انداختن ترک‌های انعکاسی و همچنین بهبود عملکرد خستگی روکش‌ها در روسازی‌های آسفالتی پرداختند. آن‌ها عملکرد ژئوسنتتیک‌ها را با استفاده از آزمون خستگی خمشی و تاثیر میان لایه‌ها بر روی مقاومت چسبندگی سطح اتصال را به کمک آزمون‌های مقاومت چسبندگی برشی و کششی ارزیابی نمودند و به جای ساخت نمونه آسفالت برای شبیه‌سازی روسازی قدیمی، آن را از یک جاده برداشت کردند. میان لایه‌های ژئوسنتتیک به کاررفته همان‌طور که در شکل ۲-۲۵ نشان داده شده است، عبارتند از:

- Polyester grid coated with polymer modified binder (G1)
- Woven geo-jute mat (G2)
- Bi-axial polypropylene grid (G3)



شکل (۲-۲۵) میان لایه‌های ژئوسنتتیک به کاررفته [۲۶]

آن‌ها آزمایش خستگی خمشی را طبق استاندارد ASTM D 7460 [۲۷] برای بررسی مقاومت نمونه در برابر ترک‌هایی با عرض ۱۰ میلی‌متر و عمق ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر انجام دادند. آن‌ها با بررسی نتایج آزمون خستگی خمشی دریافتند که نمونه‌های دارای ترک با عمق ۲۵ میلی‌متر تعداد تکرار بار بیشتری را نسبت به نمونه‌های دارای ترک ۴۰ میلی‌متری تحمل کرده‌اند. همچنین میان لایه‌های ژئوسنتتیک با سختی اولیه نسبتاً کم یعنی G1 عملکرد بهتری نسبت به ژئوسنتتیک‌های با سختی نسبتاً بالا یعنی G3 داشتند این امر می‌تواند به دلیل انتقال صحیح انرژی کرنش از آسفالت ترک‌خورده به میان لایه ژئوسنتتیک باشد.

^۱ Saride

وانگ و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۹ به بررسی عملکرد میان‌لایه‌های جاذب تنش پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود چهار نوع میان‌لایه جاذب تنش را ارزیابی نمودند که عبارتند از:

- میان‌لایه جاذب تنش تهیه شده با قیر خالص
- میان‌لایه جاذب تنش تهیه شده با قیر اصلاح شده با مخلوط خرده‌لاستیک (WTR)^۱ و APAO^۲
- میان‌لایه جاذب تنش تهیه شده با قیر اصلاح شده با مخلوط خرده‌لاستیک (WTR)
- میان‌لایه جاذب تنش تهیه شده با قیر اصلاح شده با SBS^۳

وانگ و همکاران آزمون‌های استقامت مارشال، روانی مارشال و آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم را بر روی هر چهار میان‌لایه انجام دادند. آن‌ها آزمون برش مایل^۴ در چهار شرایط مختلف شامل دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد، دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، اعمال حساسیت رطوبتی و اعمال پیرشدگی بلندمدت و همچنین آزمایش لایه روکش^۵ را بر روی سه میان‌لایه ساخته شده با قیر اصلاح شده انجام دادند. وانگ و همکاران پس از انجام این آزمایش‌ها دریافتند که:

- میان‌لایه ساخته شده با قیر اصلاح شده با مخلوط WTR و APAO پایداری بیشتر در درجه حرارت‌های بالا و مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل دارد و هر سه میان‌لایه تهیه شده با قیر اصلاح شده، مقاومت خوبی در برابر رطوبت (آب) دارند و افزودن APAO آن را بهبود می‌دهد.
- افزودن APAO عملکرد میان‌لایه جاذب تنش را در دماهای پایین ضعیف‌تر می‌کند و میان‌لایه تهیه شده با قیر اصلاح شده با مخلوط WTR و APAO ممکن است برای مناطق سرد و کوهستانی مناسب نباشد.
- میان‌لایه تهیه شده با قیر اصلاح شده با مخلوط WTR و APAO بیشترین مقاومت چسبندگی را در دماهای بالا و دماهای معمولی از خود نشان می‌دهد.
- میان‌لایه تهیه شده با قیر اصلاح شده با مخلوط WTR و APAO و میان‌لایه تهیه شده با قیر اصلاح شده با SBS مقاومت بهتری در برابر ترک خوردگی انعکاسی دارند.

^۱ Waste Tire Rubber (WTR)

^۲ Amorphous Ploy Alpha Olefin (APAO)

^۳ Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)

^۴ Slant Shear Test

^۵ Overlay Tests

فصل ۳: تئوری‌ها و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

با توجه به موضوع اصلی این تحقیق و اهداف آن قبل از بیان فعالیت‌های آزمایشگاهی، برای درک صحیح موضوع و هدفمند ساختن آن و در نهایت نتیجه‌گیری بهتر در پایان، لازم است ابتدا مباحث تئوری مربوطه بیان گردد.

۳-۲- ترک‌ها در روسازی

۳-۲-۱- عوامل ایجاد ترک در روسازی

ایجاد و انتشار ترک در روسازی به دلیل ضعف سازه‌ی روسازی در برابر عوامل ایجادکننده تنش‌ها می‌باشد. به طور کلی عوامل ایجاد و انتشار ترک‌ها در روسازی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- بارهای ترافیکی
- عوامل جوی و تنش‌های حرارتی
- نشست لایه‌های زیرین

الگوهای ایجاد و انتشار ترک‌ها در لایه روکش نیز همانطور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، بر اساس سه الگوی زیر است:

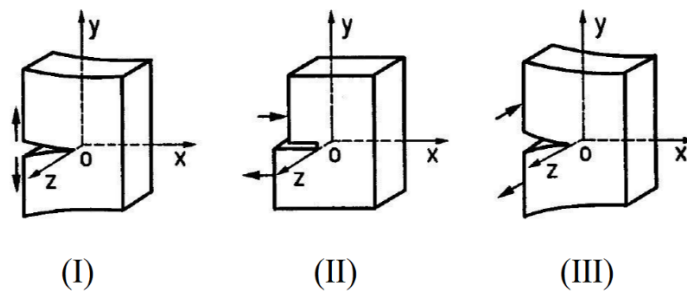
- مود بازشدگی^۱: این حالت تحت اثر کشش خالص می‌باشد و به دلیل گرادیان حرارتی در عمق لایه‌های روسازی و وارد شدن بار بر راس ترک است.
- مود برشی^۲: این حالت در شرایط نامتقارن اعمال بار بر روسازی ایجاد می‌گردد.
- مود پیچشی^۳: این حالت نیز زمانی اتفاق می‌افتد که بار دقیقاً در نوک ترک‌های طولی یا عرضی وارد گردد. چنانچه در محل ترک نیز پیچش ایجاد شود این حالت از گسیختگی اتفاق می‌افتد.

گسیختگی و انتشار ترک به لایه‌های فوقانی بیشتر تحت اثر الگوی مود بازشدگی است. لازم به ذکر است که وقوع مود پیچشی اغلب متداول نبوده و ایجاد نمی‌شود.

^۱ Opening Mode (I)

^۲ Sliding Mode (II)

^۳ Tearing or Antiplane Mode (III)



شکل (۱-۳) انواع موده‌های ترک خوردگی

۲-۲-۳- انواع ترک

با توجه به عوامل موثر بر ایجاد ترک‌ها در روسازی، می‌توان آن‌ها را به صورت زیر دسته بندی

نمود: [۲۹]

- ترک‌های نوع ۱: این ترک‌ها به دلیل اختلاف و عدم تطابق بین هندسه و سختی غلتک متراکم کننده مخلوط آسفالتی است. این ترک‌ها مویی و ریز هستند و در سطح روسازی ایجاد شده و به سمت پایین گسترش می‌یابد.
- ترک‌های نوع ۲: این ترک‌ها ناشی از تغییرات دمایی و بارگذاری ترافیکی هستند. ترک‌های انعکاسی جزء این دسته هستند مسیر انتشار این ترک‌ها از پایین به بالا تا رسیدن به سطح لایه روکش است
- ترک‌های نوع ۳: این گروه، ترک‌های ایجاد شده در کناره‌های روسازی هستند که جهت انتشار آن‌ها افقی می‌باشد. این ترک‌ها به دلیل تعریض روسازی یا ناپایداری شانه‌ها و شیروانی‌های کناری جاده و عدم تراکم یکنواخت لایه‌های زیرین ایجاد می‌شوند.
- ترک‌های نوع ۴: این گونه ترک‌ها در وسط روسازی ایجاد می‌شوند. این ترک‌های طولی و عرضی به دلیل اجرای مرحله‌ای روسازی و لایه روکش ایجاد می‌شوند و به عبارتی درزهای ناشی از محدودیت عرض کار می‌باشند.

۳-۲-۳- مسیر رشد ترک‌ها

به منظور طراحی روکش مناسب و در نظر گرفتن سیستم‌های مقاوم در برابر رشد ترک از جمله

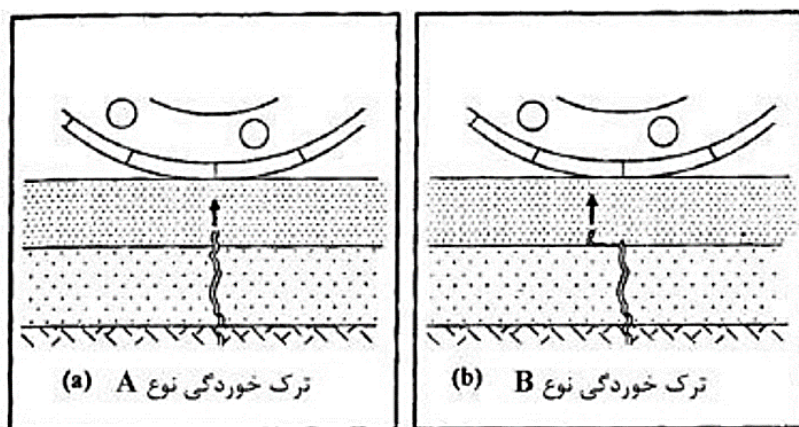
میان لایه‌های مستهلک کننده ترک در روسازی، شناسایی مسیرهای رشد و نفوذ ترک اهمیت زیادی دارد. نحوه‌ی انتشار و انعکاس ترک‌ها از لایه‌های زیرین به درون لایه روکش تابع ویژگی‌ها و خصوصیات سطح تماس بین لایه روکش و لایه روسازی زیرین است.

محققان با استفاده از نرم افزار CAPA3D چگونگی رشد ترک‌ها، مسیرهای رشد و انتشار آن‌ها را ارزیابی کرده و تاثیر خصوصیات سطح تماس بین لایه روکش و روسازی زیرین را بر روی مسیرهای انتشار و انعکاس ترک‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. [۳۰] انواع مسیرهای رشد ترک به درون لایه روکش که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، بسته به شرایط هندسی و خصوصیات فیزیکی مصالح عبارتند از:

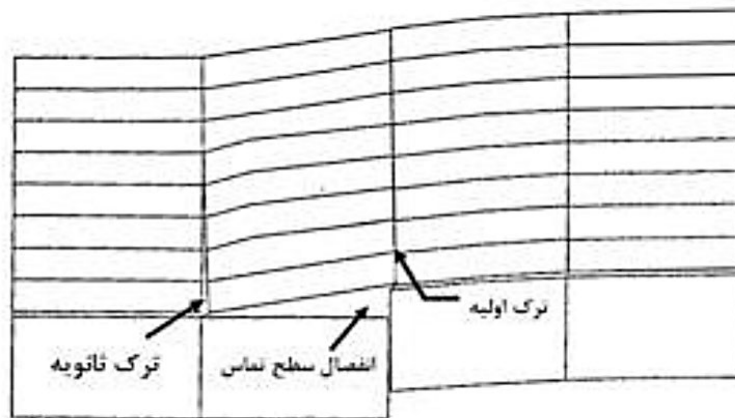
- ترک خوردگی نوع A: این نوع ترک خوردگی زمانی اتفاق می‌افتد که ترک‌ها مستقیماً در راستای ترک‌های قبلی انتشار می‌یابند.

- ترک خوردگی نوع B: در این حالت ترک‌ها با فاصله‌ی کمی از ترک‌های قدیمی گسترش می‌یابند. این حالت به دلیل ضعیف بودن و انفصال سطح تماس بین لایه روکش و روسازی موجود رخ می‌دهد.

در یک حالت کلی رشد و انتشار ترک به درون لایه روکش بدین صورت است که در مرحله‌ی اول ترک‌های اولیه (نوع A) ایجاد می‌شوند، در مرحله‌ی دوم انفصال بین سطح تماس دو لایه در نزدیکی ترک‌های اولیه به وجود می‌آید و در مرحله‌ی سوم تنش‌های کششی ناشی از خمش افزایش می‌یابند و در نهایت در مرحله‌ی چهارم ترک‌های ثانویه (نوع B) ایجاد می‌شوند. در شکل ۳-۳ تصویر مربوط به رشد و انتشار ترک به درون لایه روکش طبق این الگو نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) انواع مسیرهای رشد ترک [۳۰]



شکل (۳-۳) رشد و انتشار ترک‌های اولیه (نوع A) و ترک‌های ثانویه (نوع B) به درون لایه روکش [۳۰]

هر چقدر چسبندگی و اتصال بین لایه روکش و روسازی زیرین ضعیف‌تر و سست‌تر باشد، میزان رشد ترک در سیکل‌های بالاتر بارگذاری کندتر بوده و گسترش ترک از نوع B است. هنگامی که تماس کامل بین لایه روکش و روسازی قدیمی برقرار باشد ولی از لایه‌میان‌ی مستهلک کننده ترک استفاده نگردد، هر چند که در سیکل‌های اولیه‌ی بارگذاری مقاومت لایه روکش بالاتر است ولی سیکل‌های بالاتر افزایش سرعت رشد ترک‌ها را به دنبال خواهد داشت. در صورتی که با استفاده از میان‌لایه مستهلک کننده ترک، میزان جذب انرژی در نوک ترک بیشتر بوده و رشد و انتشار ترک در سیکل‌های بالاتر کندتر خواهد بود. در این حالت نیز رشد و گسترش ترک طبق الگوی B می‌باشد.

۳-۳- تئوری آزمون خمش سه نقطه‌ای^۱

این آزمایش عبارتست از بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های دال آسفالتی تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت. در این آزمایش دال آسفالتی بر روی دو تکیه‌گاه قرار گرفته و بار به وسط نمونه اعمال می‌شود. فاصله تکیه‌گاه‌ها از یکدیگر ۴ برابر ضخامت تیر (نمونه) آسفالتی است [۳۱]. داده‌ها و خروجی‌های بدست آمده حاصل از انجام این آزمایش نیروی حداکثر (P_{ult}) و تغییر شکل در هنگام اعمال بار حداکثر (U) است. پس از تعیین این دو پارامتر سایر پارامترهای موردنیاز برای مقاومت ترک‌خوردگی در استاندارد AASHTO عبارتند از: سختی شکست (σ_F)^۲ و انرژی شکست (G_F)^۳. برای

^۱ Three Point Bending Test

^۲ Fracture Toughness

^۳ Fracture Energy

بدست آوردن سختی شکست از رابطه ۱-۳ استفاده می شود:

$$\sigma_F = \frac{3}{2} \times \frac{P_{ult} \times L}{b \times h^2} \quad (1-3)$$

که در این رابطه:

σ_F : سختی شکست (بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع)

P_{ult} : نیروی حداکثر (بر حسب نیوتن)

L : فاصله ی تکیه گاهها (بر حسب میلی متر)

b : عرض نمونه (بر حسب میلی متر)

h : ارتفاع یا ضخامت نمونه (بر حسب میلی متر)

برای محاسبه ی انرژی شکست (G_F) نیز رابطه ۲-۳ استفاده می شود:

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (2-3)$$

که در رابطه ی فوق:

W_F : مساحت زیر نمودار بار- تغییرشکل است

A_{lig} : تصویر ناحیه ی FPZ^۱ بر روی یک صفحه ی موازی با راستای ترک است.

به دلیل آن که تعیین A_{lig} دشوار است، پارامتری دیگر را برای تعریف مقاومت شکست مخلوط

آسفالتی معرفی کرده اند که به چگالی انرژی شکست^۲ می گویند و مقدار آن برابر با مساحت زیر نمودار

تنش - کرنش است.

۳-۴- آزمایش تراکم

از این آزمایش برای تعیین درصد رطوبت لازم برای تراکم خاک و رسیدن به بیشترین وزن

مخصوص استفاده می شود. همچنین در این تحقیق به منظور تهیه میان لایه اساس تثبیت شده، با انجام

آزمون تراکم، درصد رطوبت بهینه تعیین می گردد. در این آزمایش پس از دانه بندی سنگدانه ها و اختلاط

با سیمان، درصد های مختلف آب به آن اضافه شده و درون قالب آزمایش تراکم ریخته شده و به کمک

^۱ Fracture Process Zone

^۲ Fracture Energy Density (FE)

چکش تراکم (شکل ۴-۳) متراکم می‌گردد. با اندازه‌گیری وزن مخصوص آن‌ها از روابط ۳-۳ و ۴-۳، نمودار وزن مخصوص خشک- درصد رطوبت به ازای درصد رطوبت‌های مختلف ترسیم می‌گردد. درصد رطوبت متناظر با نقطه اوج این منحنی همان درصد رطوبت بهینه است.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + \omega} \quad (۳-۳)$$

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \quad (۴-۳)$$

که در این روابط:

γ_d : وزن مخصوص خشک (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب)

γ_t : وزن مخصوص طبیعی (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب)

ω : درصد رطوبت

W : وزن کل خاک (مصالح) بر حسب گرم

V : حجم کل خاک (مصالح) بر حسب سانتی‌متر مکعب



شکل (۴-۳) چکش متراکم کننده آزمون تراکم استاندارد

۳-۵- آزمایش تجزیه آسفالت^۱

به تفکیک قیر و مصالح سنگی از یکدیگر در مخلوط آسفالتی، تجزیه آسفالت گفته می‌شود. از این آزمایش جهت تعیین پارامترهای مهم مخلوط آسفالتی از جمله دانه بندی مصالح، درصد قیر، نوع قیر به کار رفته و ... استفاده می‌گردد. برای انجام این آزمایش از دستگاه استراکشن آسفالت که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، استفاده می‌شود که داخل آن یک محفظه دوار از جنس آلومینیوم می‌باشد. این محفظه از دو قسمت درب و کاسه تشکیل شده است. چرخش سریع این محفظه توسط یک اهرم بصورت دستی و ایجاد نیروی گریز از مرکز در داخل آن باعث جدا شدن قیر و مصالح سنگی از یکدیگر می‌شود.



شکل (۳-۵) دستگاه استراکشن آسفالت^۲

در این آزمایش ابتدا مقدار معینی از مخلوط آسفالت (حدود ۳۰۰ گرم) در داخل ظرف دستگاه آزمایش ریخته شده و ظرف در جایگاه خود قرار می‌گیرد. سپس بر روی آن فیلتر و درپوش قرار گرفته و گیره های نگهدارنده محکم می‌گردد. هنگام استفاده از دستگاه سانتریفوژ باید دقت نمود که افزایش سرعت به آرامی صورت پذیرد. در نهایت برای محاسبه درصد قیر از فرمول ۳-۵ استفاده می‌شود.

$$P_b = \frac{A - (C - B)}{A} \times 100 \quad (۳-۵)$$

^۱ Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures (ASTM D 2172)

^۲ Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures

در این رابطه:

P_b : درصد قیر

A : وزن کل نمونه بر حسب گرم

B : وزن ظرف خالی بر حسب گرم

C : وزن ظرف به همراه مخلوط آسفالت بر حسب گرم

۳-۶- طرح اختلاط

برای تعیین طرح اختلاط بهینه آسفالت روش‌های متعددی وجود دارد. روش‌های طراحی مخلوط-

های آسفالتی عبارتند از:

• روش مارشال (ASTM D 1559)

• روش مارشال اصلاح شده (ASTM D 5581)

• روش ویم (ASTM D 1560)

• روش ژیراتوری

• روش روسازی ممتاز (Superpave)

• روش هابردفیلد

۳-۶-۱- آزمایش مارشال^۱

روش مارشال در ابتدا توسط بروس مارشال^۲ ارائه شد. هدف از این آزمایش تعیین استقامت

نمونه‌های آسفالتی بوده و برای تعیین درصد قیر بهینه طراحی و کنترل کیفیت مخلوط آسفالتی استفاده

می‌شود. طرح اختلاط به روش مارشال شامل موارد زیر است:

(۱) انتخاب قیر و مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر و انجام آزمایش‌های لازم برای

ارزیابی مرغوبیت آن‌ها

(۲) انتخاب حدود دانه‌بندی مطلوب با توجه به جداول آیین‌نامه (نشریه ۲۳۴)

(۳) تعیین درصدهایی که مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر باید با یکدیگر مخلوط

^۱ ASTM D 1559

^۲ Bruce Marshall

شوند.

۴) تعیین چگالی مصالح سنگی و قیر، چگالی واقعی و ظاهری مصالح سنگی با دانه‌بندی مطلوب (ترکیب مصالح)

۵) تهیه نمونه‌های آسفالتی با استفاده از مصالح سنگی (۱۲۰۰ گرم) و درصد‌های مختلف قیر

۶) تعیین چگالی واقعی (Gmb) نمونه‌های آسفالتی تهیه شده، که برای محاسبه Gmb سه روش وجود دارد:

۷) انجام آزمون استقامت مارشال، با قرارگیری نمونه داخل رینگ دستگاه و بارگذاری با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه

۸) انجام آزمون رایس^۱ و محاسبه حداکثر وزن مخصوص تئوریک (Gmm) و درصد هوای مخلوط متراکم شده

۹) انجام محاسبات مشخصات حجمی نمونه‌های آسفالت^۲ (درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد قیر جذب شده و درصد قیر مؤثر در نمونه‌های آسفالتی)

۱۰) ترسیم منحنی‌های تغییرات پارامترهای محاسبه شده نسبت به درصد‌های مختلف قیر

۱۱) تعیین درصد قیر بهینه

در آزمایش مارشال نمونه‌های استوانه‌ای شکل به ارتفاع $63/5$ میلی‌متر ($2/5$ اینچ) و قطر $101/6$ میلی‌متر (4 اینچ) به وسیله چکش استاندارد مارشال به وزن $4/5$ کیلوگرم که از ارتفاع 45 سانتی‌متری بر روی نمونه‌ها رها می‌شود، تهیه می‌شوند. نمونه‌ها با توجه به میزان ترافیک عبوری با تعداد 35 ، 50 یا 75 ضربه متراکم می‌گردند. برای تعیین پایداری نمونه‌ها در برابر تغییرشکل، به مدت 30 تا 40 دقیقه در حمام آب (دمای 60 درجه) قرار می‌گیرند. سپس توسط دستگاه مارشال تحت بارگذاری قرار گرفته و میزان استقامت و روانی آنها تعیین می‌گردد. پایداری، حداکثر بار وارده به نمونه قبل از گسیختگی و روانی مقدار تغییرشکل قطری نمونه در لحظه گسیختگی است.

۳-۷- روابط وزنی - حجمی

در این قسمت محاسبات وزنی - حجمی برای تعیین مشخصات نمونه مارشال ارائه شده است.

^۱ Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures (ASTM D2041)

^۲ Calculation of Volumetric Properties

همانطور که گفته شد برای تعیین چگالی واقعی (G_{mb}) نمونه‌های آسفالتی، سه روش وجود دارد که در این پروژه از روش معمولی^۱ (توزین نمونه در آب و هوا و تعیین چگالی) استفاده گردید. مقدار این پارامتر برابر با وزن نمونه در هوا به حجم واقعی آن می‌باشد و از رابطه ۳-۶ بدست می‌آید:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (۳-۶)$$

در این رابطه:

G_{mb} : وزن مخصوص واقعی نمونه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

A: وزن نمونه در هوا بر حسب گرم

B: وزن نمونه اشباع با سطح خشک^۲ بر حسب گرم

C: وزن نمونه در حالت غوطه‌وری بر حسب گرم

در مرحله بعد ابتدا ارتفاع نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و پس از قرار دادن آن‌ها درون حمام آب، آزمون استقامت مارشال انجام می‌شود.

همچنین برای بدست آوردن حداکثر وزن مخصوص تئوریک (G_{mm}) و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم، که یکی از پارامترهای مهم در تعیین درصد قیر بهینه است، مقدار ۱۲۰ گرم از مخلوط آسفالتی درون ارلن خشک و تمیز قرار داده شده و داخل ارلن آب ریخته می‌شود به طوری که ارتفاع آب ۲ سانتی‌متر بالاتر از سطح مخلوط آسفالت باشد. سپس ارلن، برای مکش هوای درون منافذ مخلوط، به دستگاه تخلیه هوا متصل می‌گردد.

از رابطه ۳-۷ برای محاسبه G_{mm} استفاده می‌شود:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)} \quad (۳-۷)$$

در این رابطه:

G_{mm} : حداکثر وزن مخصوص تئوریک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

A: وزن نمونه آسفالتی در هوا بر حسب گرم

B: وزن ارلن محتوی آب و نمونه بدون هوا بر حسب گرم

C: وزن ارلن پر از آب بر حسب گرم

^۱ ASTM D 2726

^۲ Saturated Surface Dry (SSD)

از رابطه ۳-۸ نیز برای محاسبه درصد فضای خالی نمونه متراکم استفاده می‌شود:

$$P_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (۸-۳)$$

در این رابطه:

P_a : درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده

G_{mb} : وزن مخصوص واقعی نمونه متراکم بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

G_{mm} : حداکثر وزن مخصوص تثوریک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

درصد فضای خالی مصالح سنگی^۱ و درصد فضای خالی پر شده با قیر^۲ که از پارامترهای مهم در

تعیین طرح اختلاط مناسب هستند از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$VMA = 100 - \left[\frac{(G_{mb} \times P_s)}{G_{sb}} \right] \quad (۹-۳)$$

در این رابطه:

VMA: درصد فضای خالی مصالح سنگی

G_{mb} : وزن مخصوص واقعی نمونه متراکم بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

P_s : درصد مصالح سنگی نسبت به وزن کل مخلوط

G_{sb} : وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

$$VFA = 100 \times \left(\frac{VMA - P_a}{VMA} \right) \quad (۱۰-۳)$$

در این رابطه:

VFA: درصد فضای خالی پر شده با قیر

VMA: درصد فضای خالی مصالح سنگی

P_a : درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده

^۱ Voids in the Mineral Aggregate (VMA)

^۲ Voids Filled with Asphalt (VFA)

فصل ۴: فعالیتهای آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

مطالعات پیشین و تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از لایه‌میانی مستهلک کننده ترک، تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد روسازی و کاهش سرعت انتشار و انعکاس ترک‌ها دارد. با توجه به این‌که تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی متعددی درباره‌ی تأثیر میان‌لایه‌های مختلف از جمله ژئوسنتتیک‌ها انجام شده است و از طرفی استفاده از سیستم‌های مختلف ضد ترک‌انعکاسی با وجود مزایای متعدد و افزایش عمر سرویس‌دهی روسازی، همانطور که اشاره شد، افزایش هزینه‌های اجرایی را در پی خواهد داشت. بدین منظور در این پروژه هدف، استفاده از مواد و مصالح ارزان و مصالح بازیافتی است که در کنار بهبود عملکرد روسازی، هزینه بسیار پایینی داشته باشد.

هدف برنامه آزمایشگاهی در این پروژه بررسی تأثیر میان‌لایه اساس تثبیت شده با سیمان، ماسه آسفالت، مصالح آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با سیمان در برابر رشد ترک‌های انعکاسی است. در این بخش به بیان جزئیاتی در رابطه با مواد و مصالح به‌کاررفته در تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی از جمله مصالح سنگی، قیر و سایر چسباننده‌ها پرداخته می‌شود. علاوه بر این آزمایش‌های انجام شده معرفی می‌گردند.

۴-۲- مواد و مصالح به‌کاررفته و خواص آن‌ها

آسفالت^۱ مخلوطی از سنگدانه، قیری و فیلر است و ویژگی‌ها و خواص هر یک از این مصالح تأثیر زیادی بر رفتار و عملکرد آسفالت دارد. به همین دلیل شناخت دقیق مشخصات و ویژگی‌های مصالح به‌کاررفته در تهیه مخلوط آسفالتی حائز اهمیت است. مصالح به‌کاررفته برای ساخت نمونه‌های آسفالتی شامل مصالح سنگی، قیر ۶۰/۷۰، قیر محلول (MC-250)، سیمان و مصالح آسفالت بازیافتی (RAP) می‌باشد که ویژگی‌ها و مشخصات آن‌ها در ادامه به تفکیک بیان خواهد شد.

۴-۲-۱- مصالح سنگی

دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس دانه‌بندی ارائه شده در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) می‌باشد. جدول ۴-۱ دانه‌بندی مصالح به‌کاررفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. از

^۱ Asphalt Concrete

دانه‌بندی شماره ۵ برای لایه روسازی ترک‌خورده زیرین و لایه روکش و همچنین میان‌لایه RAP و از دانه‌بندی شماره ۶ برای میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای استفاده شده است. برای تهیه میان‌لایه اساس تثبیت شده نیز از دانه‌بندی مصالح اساس نشریه ۲۳۴ استفاده شده که در جدول ۴-۲ ارائه شده است.

جدول (۴-۱) دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی [نشریه ۲۳۴]

درصد وزنی رد شده از هر الک				اندازه الک
دانه‌بندی شماره ۶		دانه‌بندی شماره ۵		
درصد انتخابی	حدود آیین‌نامه	درصد انتخابی	حدود آیین‌نامه	
-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۲,۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ)
۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۹۰-۱۰۰	۹,۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)
۹۰	۸۰-۱۰۰	۶۰	۵۵-۸۵	۴,۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۸۲	۶۵-۱۰۰	۳۸	۳۲-۶۷	۲,۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۶۰	۴۰-۸۰	۲۵	-	۱,۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۴۵	۲۵-۶۵	۱۷	-	۰,۶ میلی‌متر (شماره ۳۰)
۲۳	۷-۴۰	۱۰	۷-۲۳	۰,۳ میلی‌متر (شماره ۵۰)
۱۱	۳-۲۰	۵	-	۰,۱۵ میلی‌متر (شماره ۱۰۰)
۵	۲-۱۰	۳	۲-۱۰	۰,۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)

آزمایش دانه‌بندی مصالح بر اساس استاندارد AASHTO T 27 انجام شده است [۳۲]. برای تعیین مشخصات و خصوصیات مصالح سنگی از جمله ارزش ماسه‌ای^۱، درصد افت وزنی در مقابل سایش^۲، حدود اتربرگ^۳، درصد شکستگی^۴، درصد تطویل و تورق^۵ و همچنین درصد افت وزنی در سولفات سدیم^۶، آزمایش‌های لازم انجام شد که نتایج آن در جدول ۴-۳ نشان داده شده است [۳۳-۳۸].

^۱ Sand Equivalent Test (AASHTO T 176)

^۲ Los Angeles Abrasion Test (AASHTO T 96)

^۳ Atterberg Limits Test (AASHTO T 89,90)

^۴ Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate (ASTM D5821)

^۵ Flakiness Index and Elongation Index Tests (BS 812)

^۶ Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate (AASHTO T 104)

جدول (۲-۴) دانه‌بندی مصالح اساس [نشریه ۲۳۴]

درصد وزنی رد شده از هر الک		اندازه الک
درصد انتخابی	حدود آیین‌نامه	
۱۰۰	۱۰۰	۲۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ)
۸۰	-	۱۹ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)
۵۴	۵۰-۸۵	۹,۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۳۷	۳۵-۶۵	۴,۷۵ میلی‌متر (شماره ۸)
۲۷	۲۵-۵۰	۲ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۲۲	-	۰,۶ میلی‌متر (شماره ۳۰)
۱۷	۱۵-۳۰	۰,۴۲۵ میلی‌متر (شماره ۵۰)
۴	۲-۸	۰,۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۱۰۰)

جدول (۳-۴) نتایج آزمایشات مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج			مشخصات سنگدانه‌ها	
فیلر	ماسه ۰-۶ (میلی-متر)	مخلوط درشت‌دانه	تعداد دور	درصد افت وزنی در مقابل سایش (لس آنجلس)
-	۹۳	-	-	ارزش ماسه‌ای
-	-	۵۰۰	تعداد دور	درصد افت وزنی در مقابل سایش (لس آنجلس)
-	-	۲۳	درصد سایش	درصد افت وزنی در مقابل سایش (لس آنجلس)
N.P	N.P	-	دامنه خمیری	حدود اتربرگ
-	-	-	حد خمیری	حدود اتربرگ
غیر قابل تعیین است	غیر قابل تعیین است	-	حد روانی	حدود اتربرگ
-	-	-	در یک وجه	درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴
-	-	۸۸	در دو وجه	درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴
-	-	> ۹۵		درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۱۱	تطویل	درصد تطویل و تورق
-	-	۷	تورق	درصد تطویل و تورق
-	-	۶۱	درشت‌دانه	درصد افت وزنی در سولفات سدیم
-	۲۲	-	ریزدانه	درصد افت وزنی در سولفات سدیم

وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب مصالح سنگی نیز با انجام آزمایش‌های مربوطه تعیین شد و نتایج آن در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول (۴-۴) درصد جذب آب و وزن مخصوص مصالح سنگی*

وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		درصد جذب آب	
حقیقی	ظاهری		
۲/۷۶۰	۲/۸۴۵	۱/۱	مصالح مانده روی الک شماره ۸
۲/۷۴۰	۲/۸۷۵	۱/۵	مصالح رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
۲/۷۹۰		-	مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ (فیلر)
	۲/۷۵۶		وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی (G_{sb})

*نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.

۴-۲-۲- قیر

قیر مصرفی در این پروژه قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد و رده‌ی عملکردی آن PG 22-64 است. آزمایش‌های لازم بر روی این قیر انجام شد و نتایج آن در جدول ۴-۵ آورده شده است. برای اندود سطحی نیز از قیر محلول قیر محلول (MC-250) استفاده شده است که مشخصات این نوع قیر نیز در جدول ۴-۶ ارائه گردیده است.

جدول (۴-۵) مشخصات و خصوصیات قیر خالص مصرفی

نتایج	مشخصات استاندارد		روش آزمایش		شرح آزمایش
	AASHTO M 20		ASTM	AASHTO	
	حداکثر	حداقل			
۶۵	۷۰	۶۰	D-5	T-49	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه
۱/۰۱۵	-	-	D-70	T-228	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه
>۱۰۰	-	۱۰۰	D-113	T-51	مقدار کشش (بر حسب سانتی متر) در دمای ۲۵ درجه
۵۱/۷	۵۶	۴۹	D-36	T-53	نقطه نرمی (بر حسب درجه سانتی گراد)
۹۹/۳	-	۹۹	D-2042	T-44	حلالیت در تترا کلرواتیلن (بر حسب درصد)
۳۰۲	-	۲۳۲	D-92	T-48	درجه اشتعال روباز-کلوند (بر حسب درجه- سانتی گراد)
۷۵۰	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۲۰ درجه (بر حسب سانتی استوکس)
۳۵۴	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه (بر حسب سانتی استوکس)
۱۳۴	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۶۰ درجه (بر حسب سانتی استوکس)
لعاب نازک قیر (۵ ساعت در دمای ۱۶۳ درجه سانتی گراد)					
۰/۰۲	۰/۸	-	D-1756	T-179	افت حرارتی (بر حسب درصد)
۴۱	-	-			درجه نفوذ (بعد از افت حرارتی)
۶۳/۱	-	۵۴			نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه
>۵۰	-	۵۰			مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در دمای ۲۵ درجه
حساسیت حرارتی قیر					
-۰/۱۴					PI بر حسب درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه و نقطه نرمی
-۰/۸۷					PVN بر حسب درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه و ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۳۵ درجه

* نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.

جدول (۴-۶) مشخصات و خصوصیات قیر محلول (MC-250)

روش آزمایش	حداکثر	حداقل	مشخصات
ASTM D 2170	۵۰۰	۲۵۰	ویسکوزیته کینماتیکی (میلی مترمربع بر ثانیه) در دمای ۶۰ درجه
ASTM D 3143	-	۶۶	درجه اشتعال روباز (بر حسب درجه سانتی گراد)
آزمون تقطیر			
درصد حجمی مواد تقطیر شده در درجه حرارت‌های مختلف نسبت به آنچه در ۳۶۰ درجه سانتیگراد تقطیر می شود			
ASTM D402	۲۰	-	در ۲۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D402	۵۵	۵	در ۲۶۰ درجه سانتی گراد
ASTM D402	۹۰	۶۰	در ۳۱۶ درجه سانتی گراد
ASTM D402	-	۶۷	درصد حجمی مواد تقطیر شده در درجه حرارت‌های مختلف نسبت به آنچه در ۳۶۰ درجه سانتیگراد تقطیر می شود
آزمون روی پسماند تقطیر			
ASTM D5	۳۰۰	۱۲۰	درجه نفوذ در ۲۵ سانتی گراد
ASTM D113	-	۱۰۰	شکل پذیری در ۲۵ سانتی گراد در سانتی متر
ASTM D2042	-	۹۹	انحلال پذیری در تریکلرواتیلن (بر حسب درصد)
ASTM D95	۰/۲	-	آب (بر حسب درصد)

۴-۳- طرح اختلاط به روش مارشال

در این پروژه به منظور تعیین طرح اختلاط بهینه‌ی آسفالت از روش مارشال استفاده شد. نمونه‌های مارشال برای لایه روسازی زیرین و لایه روکش با مقدار قیر ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد و برای میان لایه آسفالتی ماسه‌ای با مقدار قیر ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ درصد تهیه شدند. همچنین به منظور شبیه‌سازی ترافیک سنگین، نمونه‌ها با ۷۵ ضربه متراکم شدند.

پس از انجام آزمایش مارشال، نمودارهای استقامت مارشال، روانی مارشال، وزن مخصوص واقعی، درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد فضای خالی پر شده با قیر و درصد فضای خالی آسفالت متراکم شده در درصدهای مختلف قیر ترسیم شد.

حال درصد قیری که به ازای آن نمونه آسفالتی حداکثر استقامت مارشال را دارد بدست می‌آید،

اما ممکن است به ازای این درصد قیر بیشترین وزن مخصوص بدست نیاید و یا مقدار فضای خالی آسفالت مناسب‌ترین نباشد. بنابراین مقدار قیر بهینه، میانگین مقادیری است که به ازای آن حداکثر استقامت مارشال، حداکثر وزن مخصوص و مناسب‌ترین مقدار فضای خالی در آسفالت بدست آید. همچنین بر اساس روش انجمن ملی روسازی‌های آسفالتی^۱ درصد قیر بهینه مطابق با درصد هوای مناسب مخلوط آسفالتی تعیین می‌شود. در این روش پیشنهاد می‌گردد که مقدار میانه درصد هوای مخلوط (۴درصد) به عنوان درصد قیر بهینه انتخاب شود. سپس مقدار درصد قیر بهینه با مقدار قیر مناسب برای دستیابی به مقاومت و وزن مخصوص حداکثر و روانی حداقل مقایسه می‌شود و سازگاری درصد قیر بهینه با همه‌ی این معیارها بررسی می‌گردد.

با ترسیم نمودارهای مذکور (شکل ۴-۱) مقدار قیر بهینه برای لایه روسازی زیرین و لایه روکش ۵/۲ درصد بدست آمد. همچنین برای میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای مقدار قیر بهینه ۸/۴ درصد تعیین گردید.

۴-۴- آزمایش تراکم

با توجه به این‌که براساس محل قرار گیری مخلوط تثبیت شده در روسازی (اساس، زیراساس یا میان‌لایه) درصد محتوای چسباننده‌های مختلف متفاوت است [۳۹]، به منظور تهیه میان‌لایه اساس تثبیت شده، ابتدا ۵ درصد سیمان به مخلوط اضافه شد و سپس درصد رطوبت بهینه برای تراکم این میان‌لایه با انجام آزمون تراکم تعیین گردید. در این آزمایش با افزودن مقادیر مختلف آب و اندازه‌گیری وزن مخصوص آن‌ها، نمودار وزن مخصوص خشک- درصد رطوبت به ازای درصد رطوبت‌های مختلف ترسیم شد. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۲، درصد رطوبت بهینه ۵/۶ درصد است.

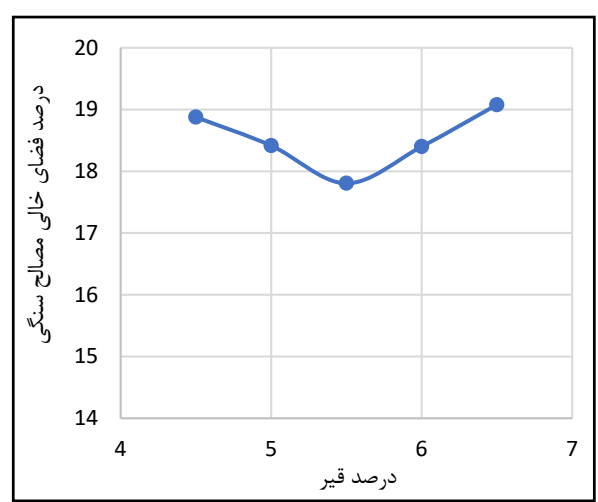
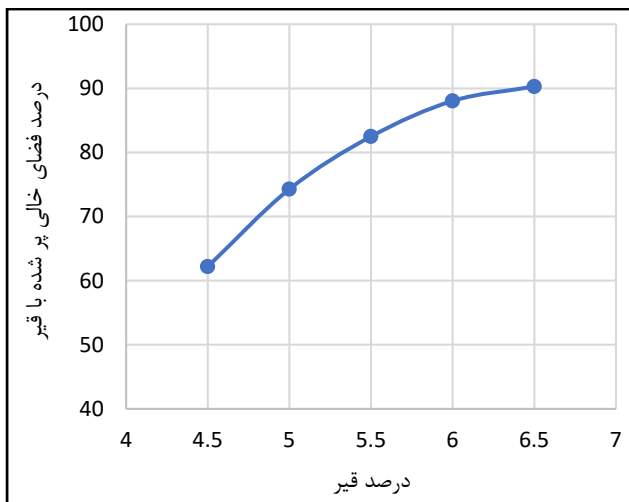
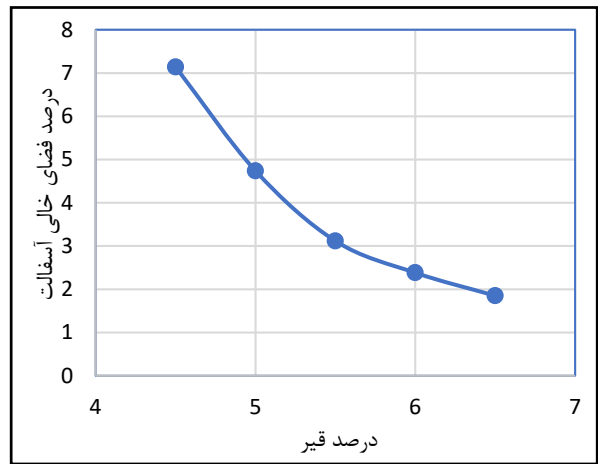
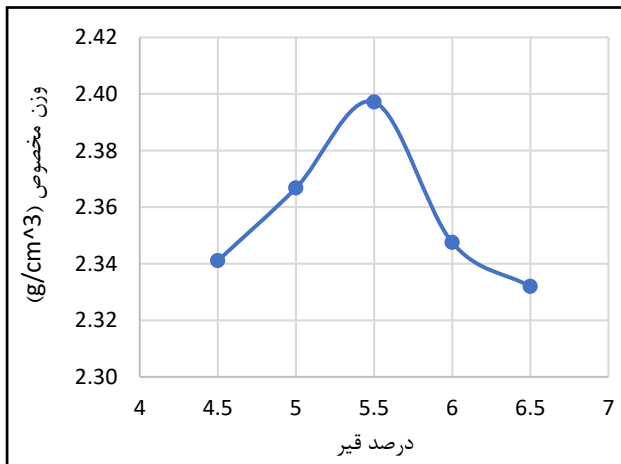
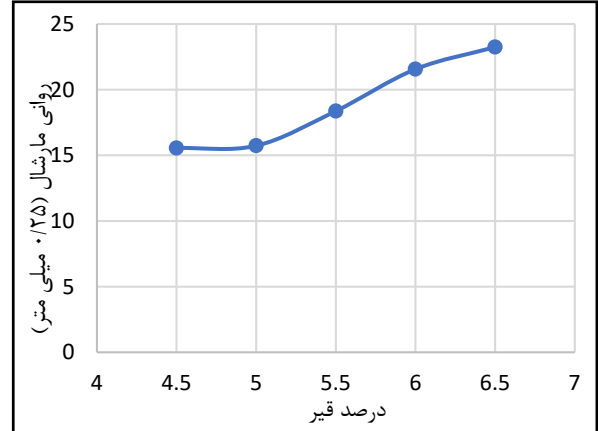
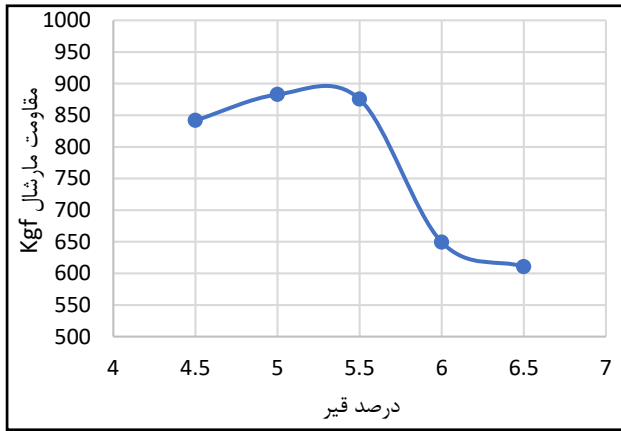
۴-۵- آزمایش تجزیه آسفالت^۲

چون یکی از میان‌لایه‌های به کاررفته در این پروژه، مصالح آسفالت بازیافتی (RAP) تثبیت شده با قیر است، ابتدا درصد قیر موجود در آن‌ها را تعیین کرده و سپس تا رسیدن مقدار قیر این مصالح به درصد قیر بهینه به آن قیر افزوده می‌گردد. بدین ترتیب با استفاده از فرمول ۳-۵ مقدار درصد قیر موجود

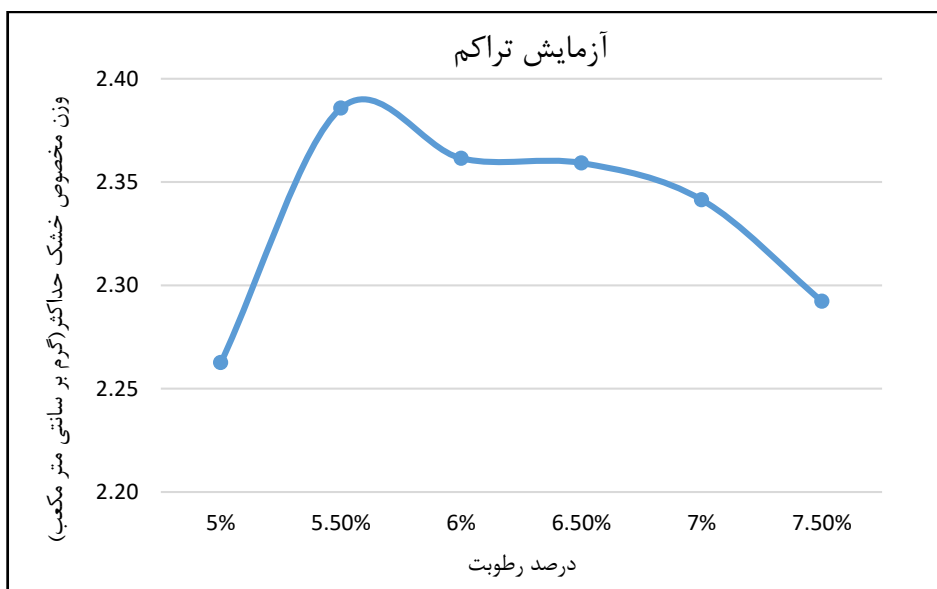
^۱ National Asphalt Pavement Association (NAPA)

^۲ Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures (ASTM D 2172)

در مصالح آسفالت بازیافتی ۴ درصد بدست آمد.



شکل (۴-۱) نمودارهای تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال



شکل (۴-۲) نمودار وزن مخصوص خشک - درصد رطوبت

۴-۶- تهیه نمونه‌های دال آسفالتی

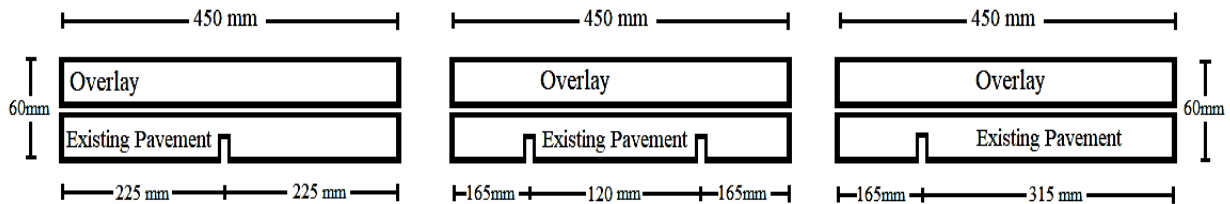
نمونه‌های دال آسفالتی تهیه شده در این تحقیق همان‌طور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، شامل نمونه‌های کنترلی (فاقد میان‌لایه) و نمونه‌های دارای میان‌لایه می‌باشند. برای اختلاط مصالح سنگی با قیر و تهیه دال‌های آسفالتی از میکسر و جک هیدرولیکی و یک قالب تراکم استفاده گردید. ابعاد این قالب تراکم، $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 180 \text{ mm}^H$ می‌باشد. در شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵ قالب تراکم، جک هیدرولیکی و میکسر نشان داده شده‌است. برای تراکم مخلوط‌های آسفالتی، ابتدا یک نمونه مارشال با درصد قیر بهینه تهیه و وزن مخصوص آن اندازه‌گیری شد. سپس مطابق با آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران ۹۷ درصد وزن مخصوص نمونه مارشال به عنوان مخصوص نمونه‌های دال آسفالتی در نظر گرفته شد.

۴-۶-۱- لایه روسازی زیرین

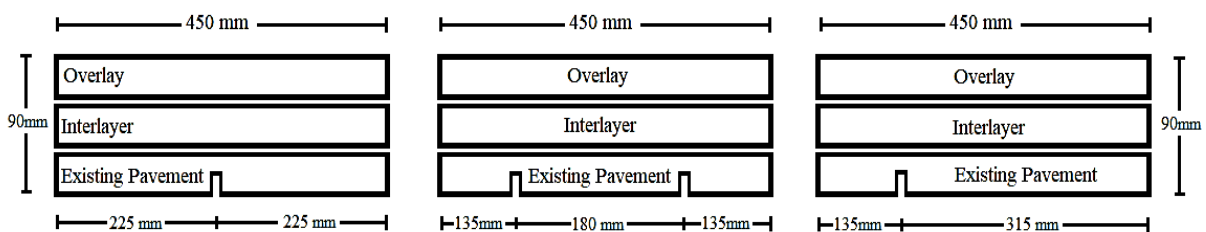
در مرحله اول به منظور شبیه‌سازی لایه روسازی ترک‌خورده زیرین یک صفحه فولادی، که یک تیغه فولادی نیز به صورت قائم بر روی آن نصب شده، در کف قالب قرار داده شد. پس از دانه‌بندی مصالح سنگی طبق دانه‌بندی ارائه شده در جدول ۴-۱، آن‌ها به همراه قیر درون گرمخانه^۱ قرار گرفته

^۱ Oven

و سپس با هم مخلوط شدند. در مرحله بعد مخلوط آسفالتی درون قالب تراکم ریخته شد و متراکم گردید. طول و عرض این لایه همانطور که گفته شد، به ترتیب ۴۵ سانتی‌متر و ۱۵ سانتی‌متر است و ضخامت آن ۳ سانتی‌متر می‌باشد.



نمونه‌های کنترلی



نمونه‌های با میان‌لایه مستهلک کننده ترک

(۱)

(۲)

(۳)

شکل (۳-۴) شماتیکی از نمونه‌های آزمایش و محل قرارگیری ترک‌ها



شکل (۴-۴) جک هیدرولیکی و قالب تراکم دال‌های آسفالتی



شکل (۴-۵) میکسر آسفالت

عرض (بازشدگی) ترک‌های موجود در لایه روسازی زیرین ۲ میلی‌متر است. عمق این ترک‌ها به اندازه $\frac{1}{2}$ ضخامت لایه روسازی زیرین (۱۵ میلی‌متر) می‌باشد. همانطور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، سه حالت برای محل قرارگیری این ترک‌ها در لایه روسازی زیرین در نظر گرفته شد. جانمایی ترک‌ها بر اساس محل اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها در آزمایش خمش سه نقطه‌ای است که عبارتند از: یک ترک در وسط نمونه (ترک میانی)، دو ترک هر کدام وسط تکیه‌گاه و محل اعمال بار به نمونه (ترک دوگانه)، یک ترک وسط تکیه‌گاه و محل اعمال بار به نمونه (ترک کناری).

۴-۶-۲- لایه‌میانی مستهلک کننده ترک

در مرحله دوم پس از ساخت لایه روسازی زیرین برای اجرای لایه‌میانی مستهلک کننده ترک بر روی آن ابتدا اندود سطحی بر روی لایه زیرین اجرا شد و پس از گذشت مدت زمان لازم برای گیرش قیر محلول، لایه‌میانی روی آن اجرا گردید. ضخامت تمام این میان‌لایه‌ها نیز ۳۰ میلی‌متر است.

۴-۶-۲-۱- لایه‌میانی آسفالت ماسه‌ای

پس از اختلاط مصالح سنگی دانه‌بندی شده (دانه‌بندی ۶ جدول ۴-۱) و قیر به کمک میکسر، مخلوط آسفالت ماسه‌ای داخل قالب تراکم روی لایه روسازی زیرین ریخته و متراکم شد.

۴-۶-۲-۲- لایه میانی اساس تثبیت شده با سیمان

برای ساخت و اجرای این میان لایه نیز ابتدا مصالح سنگی طبق دانه بندی ارائه شده در جدول ۴-۴-۲ دانه بندی شد. سپس با مقدار مورد نیاز سیمان مخلوط گردید. در مرحله بعد رطوبت (آب) مورد نیاز به مخلوط اضافه شد و بر روی لایه روسازی زیرین ریخته و متراکم شد (شکل ۴-۶)



شکل (۴-۶) نمونه آسفالتی با میان لایه اساس تثبیت شده

۴-۶-۲-۳- لایه میانی آسفالت بازیافتی

برای اجرا این میان لایه، مصالح آسفالت بازیافتی مطابق دانه بندی شماره ۵ جدول ۴-۴-۱ دانه بندی و به مدت ۲ ساعت درون گرمخانه قرار داده شد. سپس بدون افزودن ماده‌ای دیگر به کمک میکسر کاملاً مخلوط شد و روی لایه روسازی زیرین ریخته و متراکم شد.



شکل (۴-۷) مصالح آسفالت بازیافتی دانه بندی شده

۴-۶-۲-۴- لایه‌میانی آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر

این میان لایه نیز مشابه میان لایه آسفالت ریزدانه است، با این تفاوت که پس از قرار دادن مصالح داخل گرمخانه، قبل از تراکم به همراه ۱/۲٪ قیر مخلوط گردید و سپس بر روی لایه روسازی زیرین ریخته و متراکم شد.

۴-۶-۳- لایه روکش آسفالتی

در مرحله سوم، پس از اجرای لایه‌میانی، اندود سطحی بر روی آن ریخته شد و سپس لایه روکش آسفالتی مشابه لایه روسازی زیرین اجرا گردید. ضخامت لایه روکش آسفالتی مانند دو لایه دیگر ۳۰ میلی‌متر می‌باشد.

ابعاد نمونه‌های فاقد میان لایه (کنترلی)، $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 60 \text{ mm}^H$ و ابعاد نمونه‌های دارای میان لایه نیز $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 90 \text{ mm}^H$ می‌باشد. پس از آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی، هر یک از آنها تحت برش قرار گرفتند و در راستای طولی به دو قسمت تقسیم شدند. در نهایت نمونه‌هایی با ابعاد ۴۵ سانتی‌متر طول و ۷/۵ سانتی‌متر عرض بدست آمد.

۴-۷- دستگاه بارگذاری

برای انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های دال آسفالتی، طبق شکل ۴-۸ از یک دستگاه بارگذاری خمشی، ساخت شرکت Zwick/Roell آلمان، از نوع قاب صلب بسته^۱ با حداکثر ظرفیت ۱۵ تن استفاده شد. از رایانه متصل به دستگاه نیز به منظور جمع‌آوری داده‌های آزمایش استفاده شد. نیرو و تغییر مکان نمونه‌ها در حین آزمون خمش سه نقطه‌ای توسط نیروسنج^۲ و کرنش‌سنج‌های^۳ نصب شده بر روی دستگاه تعیین شد.

^۱ Universal Test Machine

^۲ Load Cell

^۳ LVDT



شکل (۴-۸) دستگاه بارگذاری خمش سه نقطه‌ای

همچنین به دلیل محدودیت در پایین آمدن بازوی دستگاه بارگذاری خمش سه نقطه‌ای و همچنین ضخامت کم دال‌های آسفالتی از یک فیکسچر خمش سه نقطه‌ای^۱ مطابق شکل ۴-۹ استفاده شد.



شکل (۴-۹) فیکسچر بارگذاری خمش سه نقطه‌ای

^۱ AASHTO TP 105-13

۴-۸- شرح آزمایش

آزمایش مکانیک شکست برای مخلوط‌های آسفالت باید در میانگین دمای سرویس‌دهی انجام شود تا پارامترهای شکست به طور دقیق ارزیابی گردد. [۴۰] مطابق با استاندارد آشتو^۱، محدوده دمایی ۴ تا ۳۱ درجه سانتی‌گراد به عنوان متوسط درجه حرارت آسفالت برای ارزیابی خواص مکانیکی قیر در نظر گرفته می‌شود. [۴۱] در این تحقیق به منظور تعیین پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالتی، از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. فاصله تکیه‌گاه‌ها برای نمونه‌های کنترلی ۲۴۰ میلی‌متر و برای نمونه‌های دارای میان‌لایه ۳۶۰ میلی‌متر (چهار برابر ضخامت نمونه‌ها) در نظر گرفته شد.

پس از آماده شدن، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت درون یخچال با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها در حین آزمایش به صورت یکنواخت و با نرخ ثابت است. همانطور که در قسمت قبل بیان شد، به منظور ارزیابی تأثیر سرعت بارگذاری بر روی پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالتی، از دو نرخ بارگذاری ۰/۷ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید.

^۱ AASHTO

فصل ۵: نتایج فعالیت‌های آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

در این فصل نتایج فعالیت‌های آزمایشگاهی به طول کامل تشریح شده است. نیروی حداکثر و تغییرمکان نمونه‌ها در حین آزمایش توسط نیروسنج^۱ و کرنش‌سنج‌های^۲ نصب شده بر روی دستگاه بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای تعیین شد. سایر پارامترهای موردنیاز برای مقاومت ترک‌خوردگی با استفاده از روابط ارائه شده در بخش ۳-۳ محاسبه می‌گردد. هر یک از نمونه‌های آزمایش طبق جدول ۵-۱ کدگذاری و نام‌گذاری شدند.

جدول (۵-۱) مشخصات نمونه‌های آزمایش آن‌ها به همراه نام اختصاری (کدگذاری)

نام اختصاری	مشخصات	
NI1	نمونه کنترل با ترک میانی	
NI2	NI	نمونه کنترل با ترک دوگانه
NI3		نمونه کنترل با ترک کناری
TBI1	TBI	نمونه اساس تثبیت شده با ترک میانی
TBI2		نمونه اساس تثبیت شده با ترک دوگانه
TBI3		نمونه اساس تثبیت شده با ترک کناری
SAI1	SAI	نمونه آسفالت ریزدانه با ترک میانی
SAI2		نمونه آسفالت ریزدانه با ترک دوگانه
SAI3		نمونه آسفالت ریزدانه با ترک کناری
TRI1	TRI	نمونه آسفالت بازیافتی (RAP) + قیر (۱،۲٪) با ترک میانی
TRI2		نمونه آسفالت بازیافتی (RAP) + قیر (۱،۲٪) با ترک دوگانه
TRI3		نمونه آسفالت بازیافتی (RAP) + قیر (۱،۲٪) با ترک کناری
RI1	RI	نمونه RAP با ترک میانی
RI2		نمونه RAP با ترک دوگانه
RI3		نمونه RAP با ترک کناری

^۱ Load Cell

^۲ LVDT

۲-۵- محاسبه پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی

آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های دارای میان‌لایه‌های مختلف، آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با سیمان، با دو نرخ بارگذاری مختلف، ۰/۷ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه، انجام شد و نتایج آن در جدول ۲-۵ ارائه گردید.

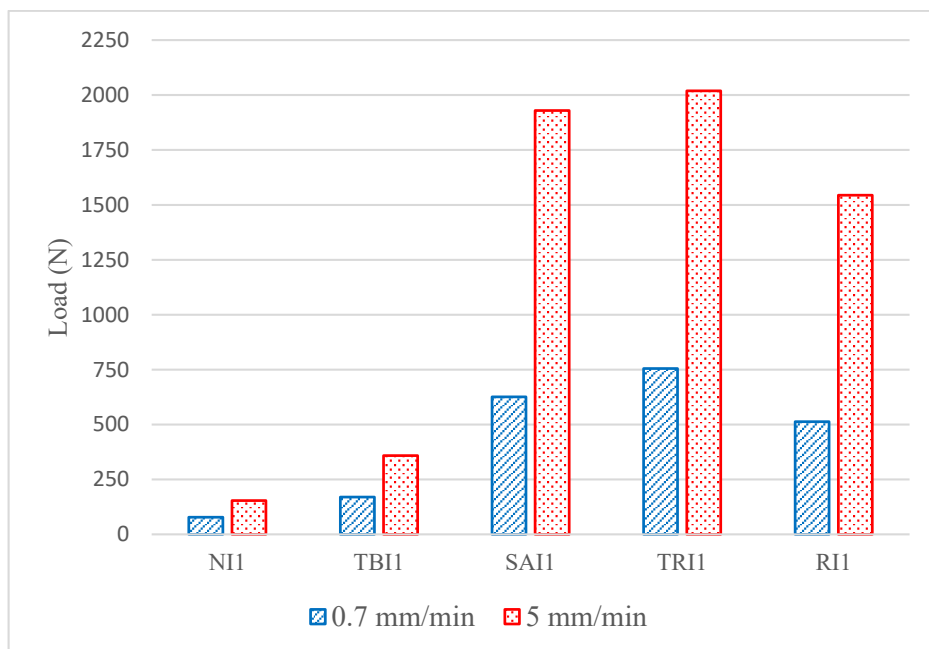
جدول (۲-۵) نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای

شماره	نمونه	بارگذاری		بارگذاری		
		با نرخ ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه		با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه		
		نیروی گسیختگی (N)	تغییر شکل گسیختگی (mm)	نیروی گسیختگی (N)	تغییر شکل گسیختگی (mm)	
1	NI 1	78.13	2.50	153.97	2.07	
2	NI	NI 2	137.07	8.11	313.01	7.01
3		NI 3	150.11	4.76	512.55	4.30
4	TBI	TBI 1	169.61	5.65	358.53	4.29
5		TBI 2	239.06	0.03	496.49	2.82
6		TBI 3	251.98	5.12	809.56	3.14
7	SAI	SAI 1	626.40	9.24	1929.79	5.73
8		SAI 2	528.14	9.80	965.69	6.12
9		SAI 3	589.11	11.24	2352.71	6.31
10	TRI	TRI 1	754.99	1.82	2019.44	1.36
11		TRI 2	753.53	5.07	1399.50	4.04
12		TRI 3	754.86	6.25	2895.48	4.73
13	RI	RI 1	513.37	1.94	1544.04	1.55
14		RI 2	383.67	5.44	654.34	5.06
15		RI 3	531.01	4.56	826.93	3.13

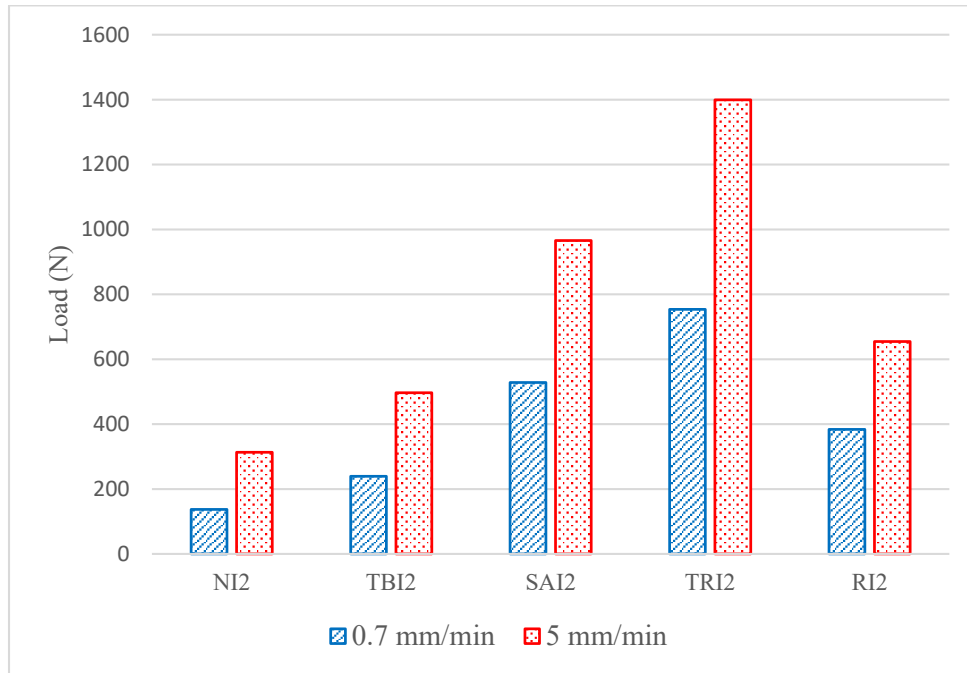
۳-۵- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر نیروی گسیختگی (نیروی شکست)

۳-۵-۱- سرعت بارگذاری

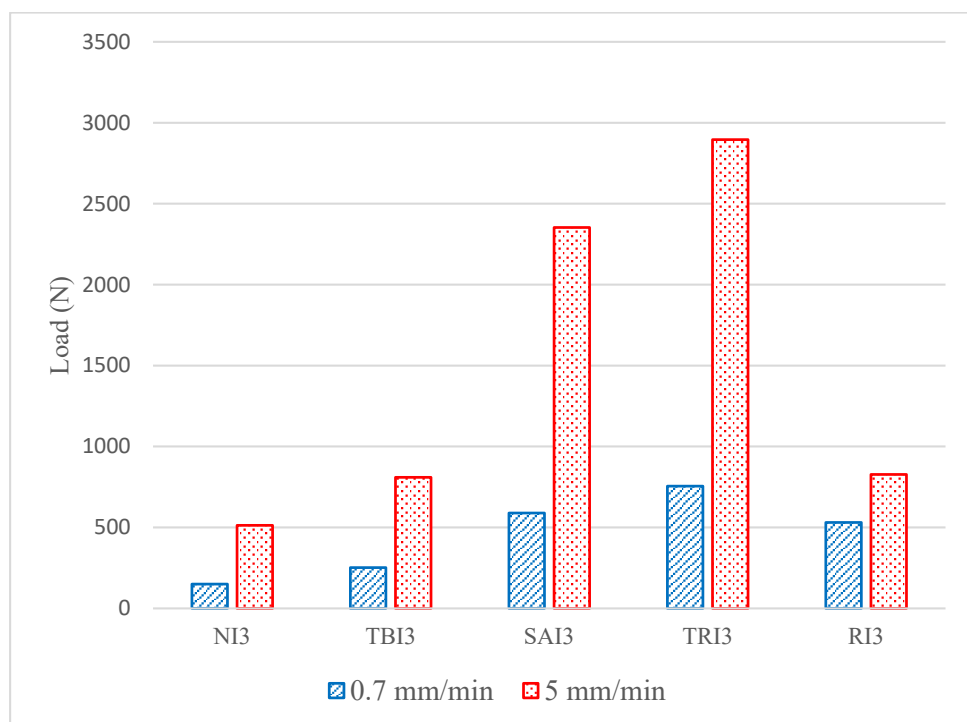
آسفالت یک ماده ویسکوالاستیک است و عوامل متعددی بر رفتار آن مؤثر می‌باشند. یکی از این عوامل، سرعت بارگذاری است. همان‌طور که گفته شد آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در این تحقیق در دو نرخ بارگذاری متفاوت انجام گردید. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی افزایش می‌یابد. طبق جدول ۲-۵ می‌توان گفت با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۷ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی گسیختگی به میزان ۱۰۰ درصد و در برخی نمونه‌ها تا میزان ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش سرعت بارگذاری، بخش الاستیک آسفالت نسبت به بخش ویسکوز آن تأثیر بیشتری بر رفتار آسفالت دارد. شکل‌های ۱-۵ تا ۳-۵ نیروی گسیختگی نمونه‌ها را به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف برای تمام میان‌لایه‌ها و حالات مختلف قرارگیری ترک نشان می‌دهند. در تمامی نمونه‌ها با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۱-۵) نیروی گسیختگی نمونه‌های دارای ترک میانی



شکل (۲-۵) نیروی گسیختگی نمونه های دارای ترک دوگانه



شکل (۳-۵) نیروی گسیختگی نمونه های دارای ترک کناری

۵-۳-۲- نوع میان لایه به کاررفته

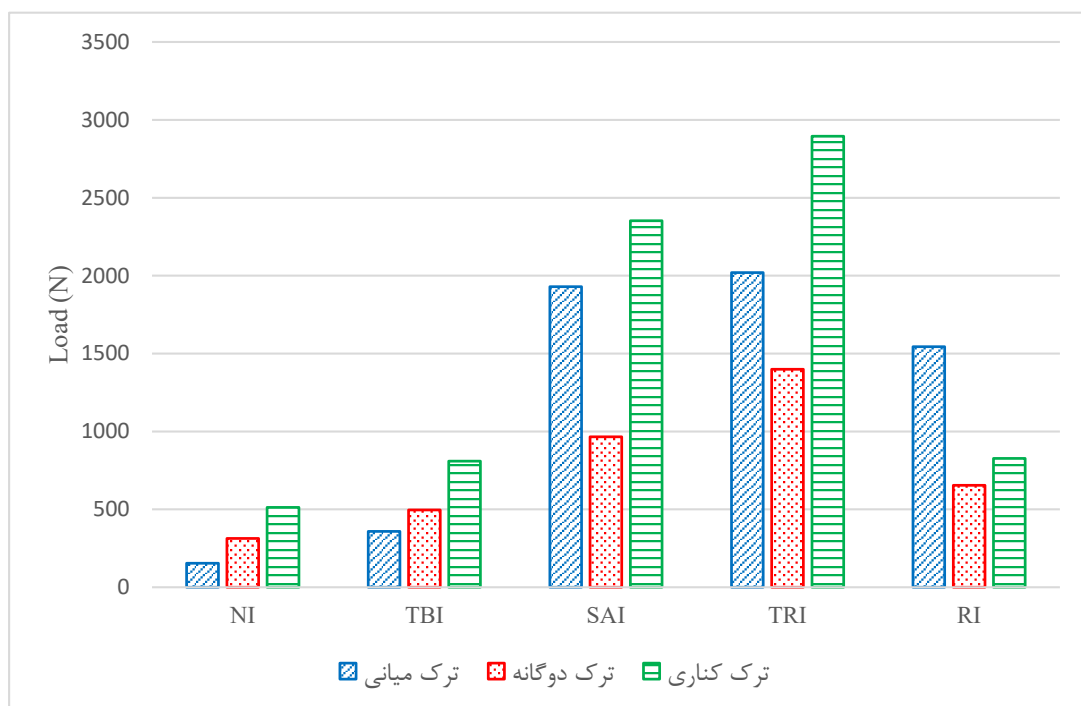
با دقت در نمودار شکل‌های ۵-۱ تا ۵-۳ می‌توان گفت نوع میان لایه به کاررفته در آسفالت نیز بر نیروی گسیختگی مؤثر است. هر چند که نمونه‌های دارای لایه‌میانی مستهلک کننده ترک، نسبت به نمونه کنترلی در تمام حالات عملکرد بهتری داشته و نیروی گسیختگی آن‌ها بیشتر است، اما از بین این میان لایه‌ها، آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر عملکرد بهتری نسبت به سایر میان لایه‌ها دارد. مدول سختی میان لایه یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن می‌باشد. میان لایه آسفالت ریزدانه به دلیل دانه‌بندی ریزتر و درصد قیر بیشتر، مدول سختی بسیار کمتری نسبت به لایه‌های آسفالتی دارد، همچنین میان لایه اساس تثبیت شده با سیمان نیز مدول سختی بسیار بیشتری نسبت به لایه‌های آسفالتی دارد. از طرفی استفاده از میان لایه آسفالت بازیافتی نیز به دلیل پیرشدگی و سفت شدن قیر موجود در آن، مدول سختی کمی بیشتر از لایه‌های آسفالتی است. اما مدول سختی میان لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر به مدول سختی لایه‌های آسفالتی نزدیک‌تر بوده و به بیان دیگر به دلیل داشتن سختی بهینه عملکرد بهتری دارد.

۵-۳-۳- محل قرارگیری ترک

محل قرارگیری ترک نیز بر نیروی گسیختگی مؤثر است. با توجه به شکل ۵-۴ در سرعت بارگذاری ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه، در تمام نمونه‌ها به جز نمونه آسفالت ماسه‌ای، بیشترین نیروی گسیختگی مربوط به نمونه‌های دارای ترک کناری است. در سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه نیز طبق شکل ۵-۵ در تمام نمونه‌ها، به جز نمونه آسفالت بازیافتی، بیشترین نیروی گسیختگی مربوط به نمونه‌های دارای ترک کناری است. به بیان دیگر با افزایش فاصله محل قرارگیری ترک و خرابی موجود، از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی نیز افزایش پیدا می‌کند. اما در مورد ترک دوگانه برای هر دو سرعت بارگذاری، به استثنای نمونه‌های کنترلی و نمونه اساس تثبیت شده با سیمان، کمترین نیروی گسیختگی مربوط به ترک دوگانه است. بنابراین این گونه می‌توان گفت که چون تعداد ترک‌ها و خرابی‌های موجود در روسازی بیشتر است، بنابراین روسازی ضعیف‌تر بوده و نیروی کمتری تحمل می‌کند.



شکل (۴-۵) نیروی گسیختگی در نمونه‌ها (سرعت بارگذاری ۷/۰ میلی متر بر دقیقه)

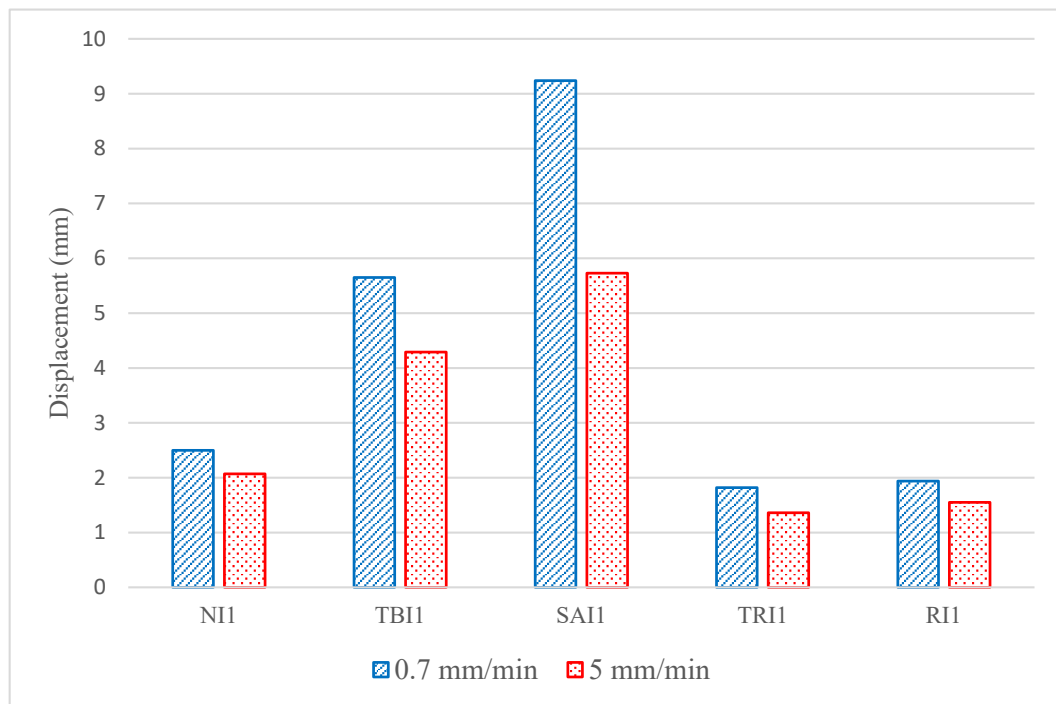


شکل (۵-۵) نیروی گسیختگی در نمونه‌ها (سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه)

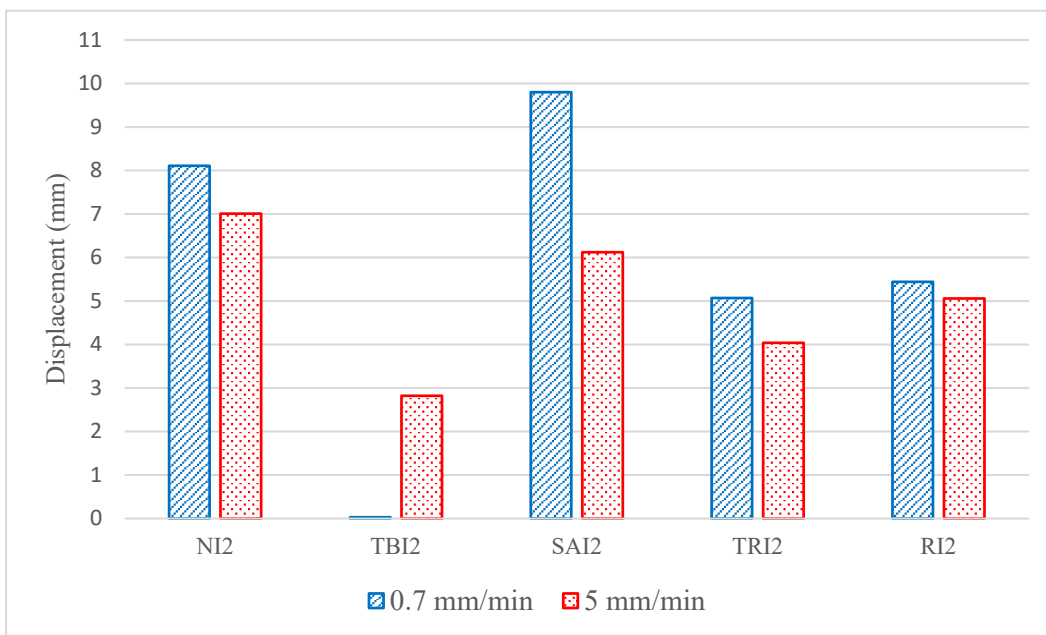
۴-۵- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر تغییر مکان گسیختگی نمونه-ها

۱-۴-۵- سرعت بارگذاری

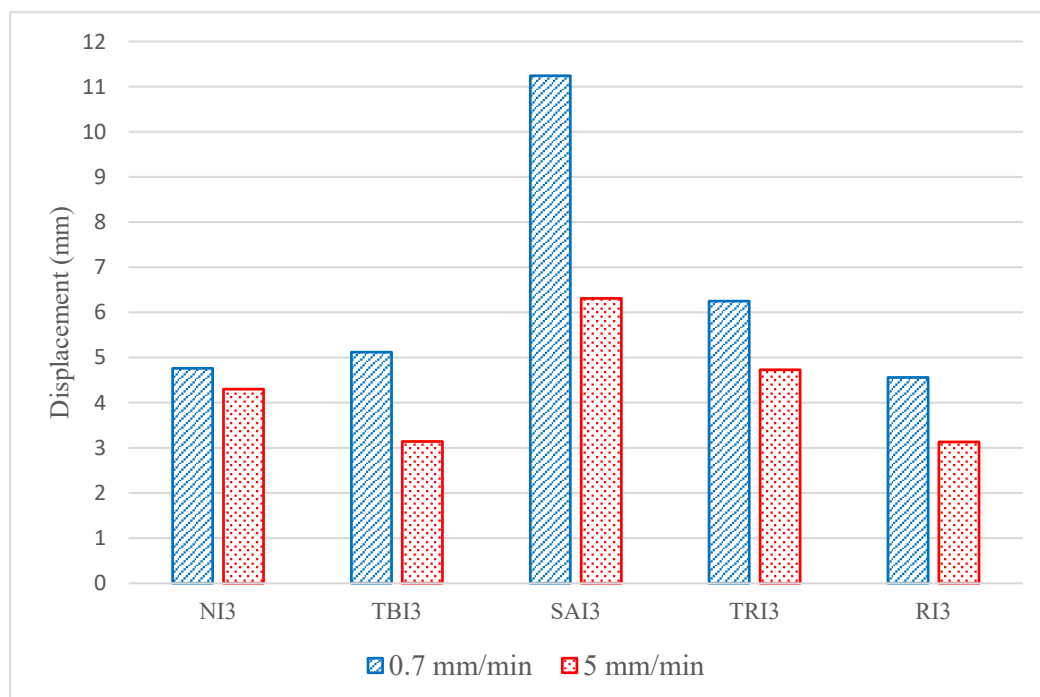
طبق شکل‌های ۵-۶ تا ۵-۸، هر چه سرعت بارگذاری افزایش یابد، به علت ماهیت ویسکوالاستیک آسفالت، تغییر مکان گسیختگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. زیرا در سرعت‌های بارگذاری کم، تغییر شکل‌های بلندمدت ناشی از رفتار بخش ویسکوز آسفالت باعث افزایش تغییر شکل تا لحظه گسیختگی نمونه‌های آسفالتی می‌شود.



شکل (۵-۶) تغییر شکل گسیختگی نمونه‌های دارای ترک میانی



شکل (۷-۵) تغییرشکل گسیختگی نمونه های دارای ترک دوگانه



شکل (۸-۵) تغییرشکل گسیختگی نمونه های دارای ترک کناری

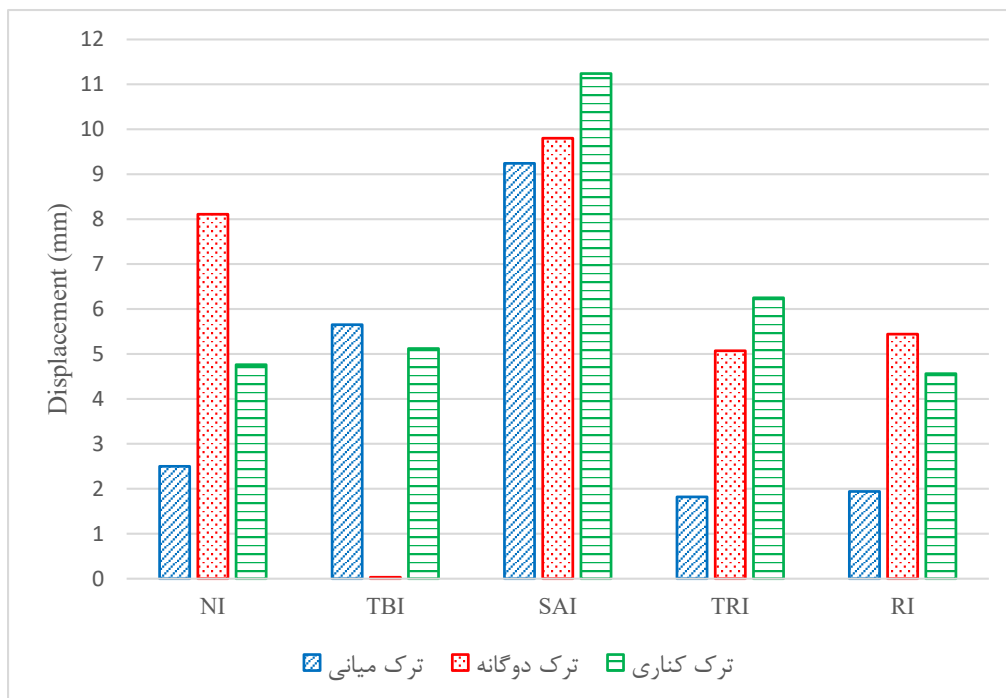
۵-۴-۲- نوع میان لایه به کاررفته

با دقت در نمودارهای فوق می‌توان دریافت که از بین میان لایه‌های به کار رفته، آسفالت ماسه‌ای به دلیل دانه‌بندی ریزتر و درصد قیر بیشتر، بیشترین تغییرشکل گسیختگی را دارد. نکته قابل توجه دیگر، تغییر شکل گسیختگی در نمونه اساس تثبیت شده با ترک دوگانه می‌باشد که تقریباً برابر صفر است. چون ترک‌های مویی و بسیار ریز در این لایه‌میانی وجود داشته که بلافاصله اندکی پس از بارگذاری نمونه دچار گسیختگی شده است.

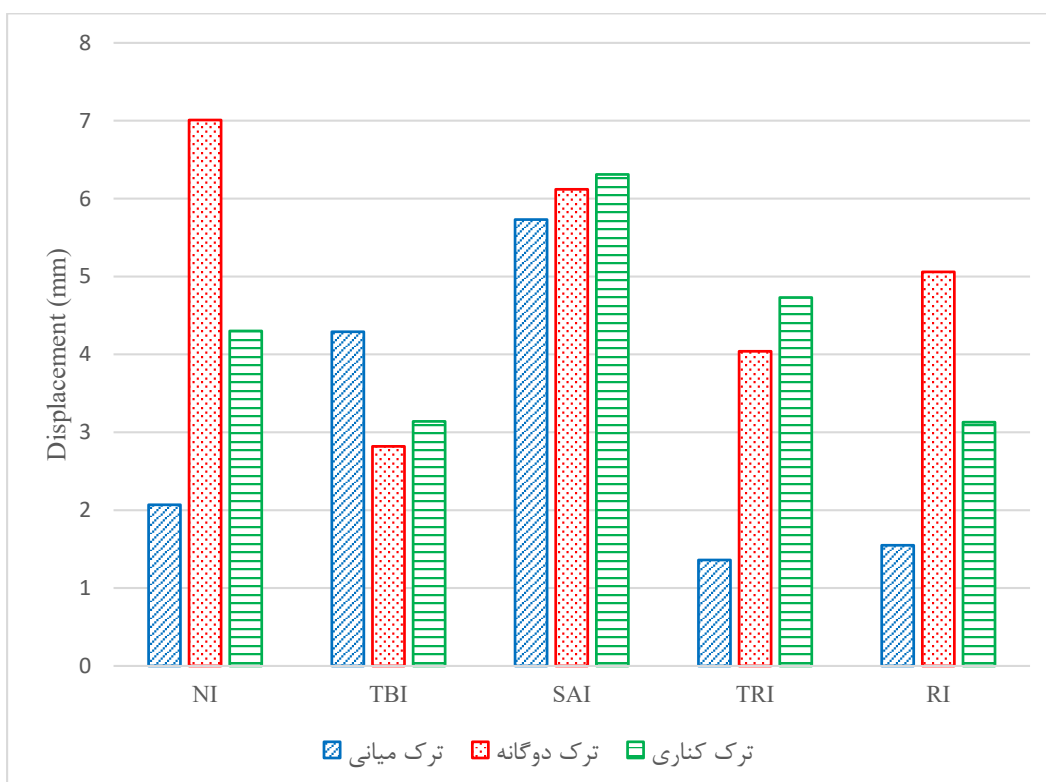
۵-۴-۳- محل قرارگیری ترک

هنگامی که ترک در زیر محل اعمال بار قرار دارد نمونه آسفالتی تغییرشکل گسیختگی کمتری دارد. همانطور که در شکل ۵-۹ و ۵-۱۰ نشان داده شده است، به ازای هر دو سرعت بارگذاری به استثنای نمونه اساس تثبیت شده با سیمان در تمامی نمونه‌ها، ترک میانی با تغییرشکل کمتری گسیخته شده است.

در مورد ترک دوگانه و ترک کناری نیز با توجه به نمودارهای زیر، به استثنای نمونه اساس تثبیت شده با سیمان، بیشترین تغییرشکل گسیختگی در نمونه‌های کنترل و آسفالت بازیافتی مربوط به ترک دوگانه است و در نمونه‌های آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر و آسفالت ماسه‌ای، بیشترین تغییرشکل گسیختگی مربوط به ترک کناری است.



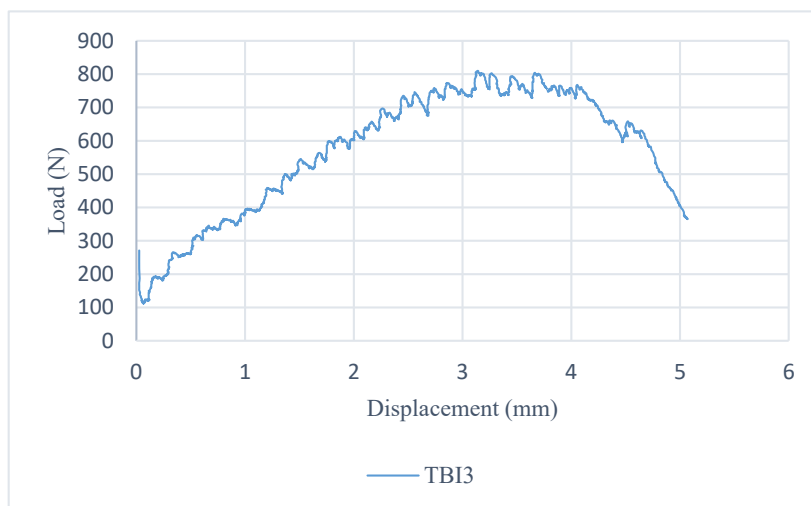
شکل (۹-۵) تغییر شکل گسیختگی در نمونه‌ها (سرعت بارگذاری ۰/۷ میلی متر بر دقیقه)



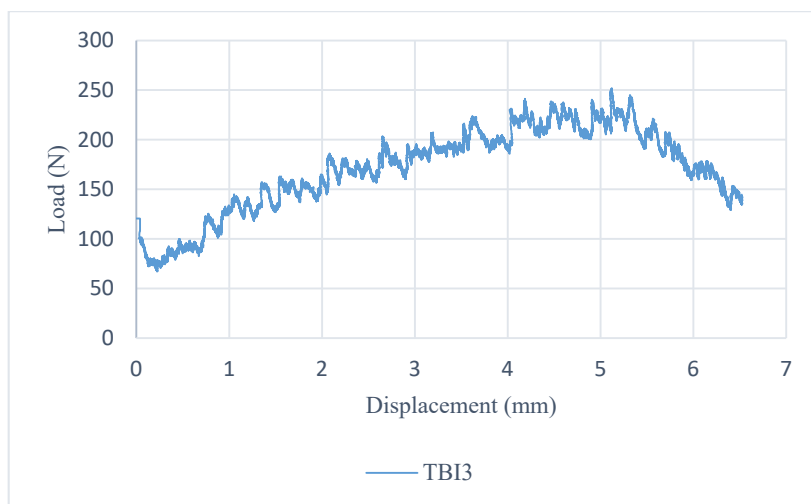
شکل (۱۰-۵) تغییر شکل گسیختگی در نمونه‌ها (سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه)

۵-۵- سختی شکست و انرژی شکست

سختی شکست نیز با توجه به رابطه ۳-۱ محاسبه می‌شود و انرژی شکست نمونه‌ها نیز برابر با مساحت زیر نمودار نیرو- تغییرشکل^۱ از ابتدا آزمایش تا لحظه گسیختگی می‌باشد. در شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ نمودار نیرو-تغییرشکل نمونه آسفالتی با اساس تثبیت شده با سیمان برای هر دو سرعت بارگذاری نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۱) نمودار نیرو-تغییرشکل نمونه اساس تثبیت شده (سرعت 5mm/min ، ترک کناری)



شکل (۵-۱۲) نمودار نیرو-تغییرشکل نمونه اساس تثبیت شده (سرعت 0.7mm/min ، ترک کناری)

^۱ Load-Displacement Diagram

برای محاسبه انرژی شکست، مساحت زیر نمودار نیرو- تغییرشکل از ابتدای آزمایش تا لحظه گسیختگی به مستطیل‌های کوچک تقسیم می‌شود. مساحت این مستطیل‌ها برابر با حاصل ضرب نیرو در تغییرشکل است و مجموع این مساحت‌ها برابر با انرژی شکست هر نمونه می‌باشد. مقادیر سختی شکست و انرژی شکست در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

جدول (۳-۵) انرژی شکست و سختی شکست

نمونه	بارگذاری با نرخ ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه		بارگذاری با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه		
	انرژی شکست KJ/m ³	سختی شکست N/mm ²	انرژی شکست KJ/m ³	سختی شکست N/mm ²	
NI	NI1	0.042	6.250	0.136	12.318
	NI2	0.331	10.966	0.928	25.041
	NI3	0.187	12.009	0.881	41.004
TBI	TBI1	0.149	13.569	0.463	28.683
	TBI2	0.001	19.125	0.274	39.719
	TBI3	0.284	20.158	0.527	64.765
SAI	SAI1	1.188	50.112	2.250	154.383
	SAI2	1.851	42.251	2.186	77.255
	SAI3	1.974	47.129	3.854	188.217
TRI	TRI1	0.327	60.399	1.062	161.555
	TRI2	0.515	60.282	1.180	111.960
	TRI3	1.053	60.389	1.604	231.638
RI	RI1	0.233	41.070	0.662	123.523
	RI2	0.491	30.693	0.745	52.347
	RI3	0.718	42.480	0.810	66.154

۵-۶- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر سختی شکست و انرژی

شکست

۵-۶-۱- سرعت بارگذاری

با توجه به رابطه ۳-۱ سختی شکست با نیروی گسیختگی رابطه مستقیم دارد و هرچه نیروی لازم برای گسیختگی نمونه بیشتر باشد، سختی شکست آن نیز بیشتر است، بنابراین می‌توان گفت، چون با افزایش سرعت بارگذاری نیروی گسیختگی افزایش می‌یابد، به همین ترتیب سختی شکست نیز زیاد می‌شود.

انرژی شکست، علاوه بر نیرو به تغییر شکل نیز وابسته است. با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی افزایش می‌یابد ولی تغییر شکل گسیختگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. اما همانطور که در جدول ۵-۳ نشان داده شده است، انرژی شکست هنگامی که سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه بوده، بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر نیروی گسیختگی بر روی انرژی شکست بیشتر از تغییر شکل است.

۵-۶-۲- نوع میان لایه به کاررفته

بیشترین سختی شکست مربوط به نمونه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر است. بیشترین انرژی شکست نیز مربوط به نمونه‌های با میان لایه آسفالت ماسه‌ای است. این میان لایه به دلیل این که تغییر شکل گسیختگی آن نسبت به سایر میان لایه‌ها بسیار بیشتر است، انرژی شکست بیشتری دارد. پس از میان لایه آسفالت ماسه‌ای، میان لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر انرژی شکست بیشتری نسبت به سایر میان لایه‌ها دارد.

از آن جا که میان لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر بیشترین نیروی گسیختگی و سختی شکست را در بین میان لایه دارد، برای جبران کمبود انرژی شکست این میان لایه در مقایسه با میان لایه آسفالت ریزدانه، می‌توان کمی درصد قیر موردنیاز برای تثبیت این میان لایه را افزایش داد و یا اینکه از جوانسازها استفاده نمود.

۵-۶-۳- محل قرارگیری ترک

با افزایش فاصله ترک از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی و در نتیجه سختی شکست افزایش می‌یابد.

انرژی شکست نیز با تغییر محل قرارگیری ترک تغییر می‌کند و بیشترین انرژی شکست مربوط به نمونه‌های با ترک کناری است. چون با افزایش فاصله محل ترک از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی زیاد می‌شود و همانطور که گفته شد تاثیر نیرو بر انرژی شکست بیشتر است و با افزایش آن انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد.

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

ترک انعکاسی یکی از شایع ترین خرابی‌ها در روسازی آسفالتی است. چنانچه روسازی ترک خورده قبل از اجرای لایه روکش جدید، ترمیم نگردد و خرابی‌های موجود در آن بر طرف نگردد، ترک‌ها و خرابی‌های موجود در آن پس از مدتی به لایه جدید وارد شده و گسترش می‌یابند. بنابراین بهتر است قبل از اجرای لایه روسازی جدید، خرابی‌های موجود برطرف شده و همچنین از یک لایه میانی قبل از اجرای لایه روکش استفاده گردد.

در این پایان‌نامه با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای مقاومت ترک خوردگی نمونه‌های آسفالتی و همچنین تأثیر میان‌لایه‌های مختلف در تقویت نمونه‌های آسفالتی ارزیابی گردید. از چهار نوع میان‌لایه مختلف شامل: آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر استفاده شد. همچنین سه حالت برای محل قرارگیری ترک شامل: ترک میانی و ترک دوگانه و ترک کناری در روسازی زیرین در نظر گرفته شد. نمونه‌ها بر روی دو تکیه‌گاه به فاصله چهار برابر ضخامت هر نمونه قرار گرفتند و بارگذاری با دو سرعت ۰/۷ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه به آن‌ها اعمال شد. نتایج حاصل به شرح زیر است:

- تقویت نمونه‌های آسفالتی با میان‌لایه‌های مختلف موجب افزایش نیروی گسیختگی و بهبود عملکرد آن‌ها (نسبت به نمونه کنترلی) می‌شود. اما از بین میان‌لایه‌های به کاررفته برای تقویت روکش‌های آسفالتی در این پژوهش، میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر عملکرد بهتری دارد و نیروی گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با آن بیشتر است. بعد از آن به ترتیب، آسفالت ماسه‌ای، آسفالت بازیافتی و اساس تثبیت شده با سیمان در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند.
- سرعت بارگذاری اعمال شده به نمونه‌های آسفالتی علاوه بر نیروی گسیختگی، بر روی تغییرشکل (کرنش) گسیختگی نیز مؤثر است. با افزایش سرعت بار وارد شده به نمونه‌ها از ۰/۷ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی گسیختگی آن‌ها بیشتر شده و تغییرشکل گسیختگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
- سرعت بارگذاری بر روی انرژی شکست نیز تأثیرگذار است و با افزایش سرعت بارگذاری، انرژی شکست نیز افزایش یافت. زیرا اگرچه با افزایش سرعت بارگذاری تغییرشکل گسیختگی نمونه کمتر می‌شود، اما نیروی گسیختگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و بنابراین انرژی شکست نیز زیاد می‌شود.

- محل قرارگیری ترک‌های موجود در لایه روسازی زیرین بر روی نیروی گسیختگی موثر است. با افزایش فاصله محل قرارگیری ترک از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی نیز افزایش می‌یابد. در مورد ترک میانی چون محل قرارگیری ترک دقیقاً زیر محل اعمال بار قرار دارد، نیروی گسیختگی نسبت به ترک کناری کمتر است. در نمونه‌های دارای ترک دوگانه اگرچه ترک در زیر محل بارگذاری قرار ندارد، اما به دلیل این‌که تعداد خرابی‌ها و ترک‌های موجود در روسازی بیشتر است، نمونه آسفالتی ضعیف‌تر بوده و نیروی کمتری تحمل می‌کند.
- از بین میان‌لایه‌ها مستهلک کننده ترک که در این تحقیق استفاده شده است، میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر عملکردی خوبی از خود نشان داده است. تنها نقص این میان‌لایه انرژی شکست کمتر آن نسبت به میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای است. اگرچه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر نیروی گسیختگی بیشتری دارد، اما میان‌لایه آسفالت ریزدانه به دلیل تغییرشکل بسیار زیاد، انرژی شکست بیشتری دارد. می‌توان برای تثبیت آسفالت بازیافتی از درصد قیر بیشتری (۲ تا ۳ درصد) استفاده کرد و یا قبل از اختلاط و تراکم آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر، از مواد جوانساز استفاده نمود.

۶-۲- پیشنهادات

- بررسی تأثیر میان‌لایه‌ها با اعمال شرایط ذوب و یخبندان بر روی نمونه‌ها
- ارزیابی تأثیر عرض (بازشدگی ترک) بر روی نیروی گسیختگی و پارامترهای شکست آسفالت
- استفاده از ماده پرکننده ترک‌های موجود در لایه روسازی زیرین و بررسی تأثیر آن بر روی پارامترهای شکست آسفالت
- اعمال پیرشدگی بلند مدت و کوتاه مدت بر روی لایه روسازی زیرین، برای ارزیابی تأثیر پیرشدگی بر پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی
- اعمال بار دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی به منظور ارزیابی بهتر نقش میان‌لایه‌های آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر در به تعویق انداختن ترک‌های انعکاسی

مراجع

- [١] R. L. Lytton, "Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 8, no. 3, pp. 217-237, 1989.
- [٢] J. Yang, P. Dai, B. Yu, and Y. Yang, "Asphalt sand stress absorbing interlayer used in asphalt pavement with semi-rigid base," in *Pavement cracking: Mechanisms, modeling, detection, testing and case histories*, RILEM Int. Conf. Cracking in Pavements, 2008, pp. 229-238 .
- [٣] S. N. Amirkhanian, F. Xiao, and K. Sockwell, "Performance properties of polymer modified pelletized asphalt mixtures," in *Airfield and Highway Pavements 2015*, 2015, pp. 120-130.
- [٤] H. U. Bahia and R. Davies, "Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders," *Asphalt paving technology*, vol. 63, pp. 414-414, 1994.
- [٥] S.-J. Lee, S. N. Amirkhanian, B. J. Putman, and K. W. Kim, "Laboratory study of the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 12, pp. 1079-1089, 2007.
- [٦] R. Siddique and T. R. Naik, "Properties of concrete containing scrap-tire rubber— an overview," *Waste management*, vol. 24, no. 6, pp. 563-569, 2004.
- [٧] F. Xiao, S. Amirkhanian, and C. H. Juang, "Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 475-483, 2007.
- [٨] M. Elseifi, "Performance quantification of interlayer systems in flexible pavements using finite element analysis, instrument response, and non destructive testing," Virginia Tech, 2003 .
- [٩] M. T. Mukhtar, *Interlayer stress absorbing composite (ISAC) for mitigating reflection cracking in asphalt concrete overlays*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.
- [١٠] J. W. Vespa, "An evaluation of interlayer stress absorbing composite (ISAC) reflective crack relief system," Illinois. Dept. of Transportation. Bureau of Materials and Physical Research, 2005 .
- [١١] A. ASTM, "773-91. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia," ed: PA, 1996.
- [١٢] S. Nithin, K. Rajagopal, and A. Veeraragavan, "State-of-the art summary of geosynthetic interlayer systems for retarding the reflective cracking," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 45, no. 4, pp. 472-487, 2015.
- [١٣] D. Sproule, T. FILSON, and D. Nunn, "Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI) Using the FiberMat (tm) Process," in *2012 CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA-TRANSPORTATION: INNOVATIONS AND OPPORTUNITIES*, 2012 .
- [١٤] A. Vanelstraete and L. Francken, "Numerical modelling of crack initiation under thermal stresses and traffic loads," in *REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENTS. STATE OF THE ART AND DESIGN RECOMMENDATIONS*.

PROCEEDINGS OF THE SECOND (MARCH 10-12, 1993) INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE, LIEGE, BELGIUM, 1993 .

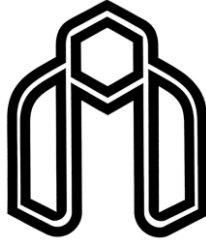
- [١٥] A. Vanelstraete and L. Francken, "Laboratory testing and numerical modelling of overlay systems on cement concrete slabs," in *Proceedings of the 3rd International RILEM Conference—Reflective Cracking in Pavements*, 1996, pp. 211-220 .
- [١٦] K. W. Kim, Y.-C. Park, and K.-S. Yeon, "Tensile reinforcement of asphalt concrete using polymer coating," *Construction and Building Materials*, vol. 10, no. ١٠, pp. 141-146, 1996.
- [١٧] F. Jaecklin and J. Scherer, "Asphalt reinforcing using glass fibre grid" Glasphalt", in *RILEM PROCEEDINGS*, 1996: CHAPMAN & HALL, pp. 268-277 .
- [١٨] S. Brown, N. Thom, and P. Sanders, "A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking (with discussion)," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 70, 2001.
- [١٩] C.-M. Kuo and T.-R. Hsu, "Traffic induced reflective cracking on pavements with geogrid-reinforced asphalt concrete overlay," in *Proceedings of the 82th Annual Meeting at the Transportation Research Board (CD-ROM)*, 2003 .
- [٢٠] K. Sobhan, M. Genduso, and V. Tandon, "Effects of geosynthetic reinforcement on the propagation of reflection cracking and accumulation of permanent deformation in asphalt overlays," in *Proceedings of the 3rd LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'05) Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective*, 2005 .
- [٢١] A. Khodaii, S. Fallah, and F. M. Nejad, "Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 1, pp. 1-8, 2009.
- [٢٢] S. Fallah and A. Khodaii, "Reinforcing overlay to reduce reflection cracking; an experimental investigation," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 43, no. 3, pp. 216-227, 2015.
- [٢٣] O. M. Ogundipe, N. Thom, and A. Collop, "Investigation of crack resistance potential of stress absorbing membrane interlayers (SAMIs) under traffic loading," *Construction and building materials*, vol. 38, pp. 658-666, 2013.
- [٢٤] L. da Silva, A. Benta, and L. Picado-Santos, "Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking," *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 539-550, 2018.
- [٢٥] N. A. Hassan, G. D. Airey, R. P. Jaya, N. Mashros, and M. Aziz, "A review of crumb rubber modification in dry mixed rubberised asphalt mixtures," *Jurnal Teknologi*, vol. 70, no. 4, pp. 127-134, 2014.
- [٢٦] S. Saride and V. V. Kumar, "Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 45, no. 3, pp. 184-196, 2017.
- [٢٧] A. D, "Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending," 2008.
- [٢٨] S. Wang, K. Yan, D. Ge, and Z. Hong, "Laboratory research on the performance of stress-absorption interlayer (SAI) of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 830-840, 2019.
- [٢٩] A. Shalaby, A. A. E. Halim, and S. Easa, "Low-temperature stresses and fracture analysis of asphalt overlays," *Transportation research record*, vol. 1539, no. 1, pp. 132-139, 1996, ١٣٩.

- [٣٠] A. Scarpas, A. De Bondt, A. Molenaar, and G. Gaarkeuken, "Finite elements modelling of cracking in pavements," in *RILEM proceedings*, 1996: Chapman & Hall, pp. 82-91 .
- [٣١] A. I. C. E. o. Fatigue and F. S. E. o. F. Mechanics, *Standard Test Method for Linear-elastic Plane-strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials*. ASTM International, 2013.
- [٣٢] T. AASHTO, "27 "Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates"," *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC*, 2014.
- [٣٣] ASTM, "Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate," 2013.
- [٣٤] B. Mathew, S. Bhuduru, and K. Isaac, "Influence of flaky and elongated aggregates on the properties of bituminous concrete mix," *Journal of the Institution of Engineers(India), Part CV, Civil Engineering Division*, vol. 87, pp. 54-58, 2006.
- [٣٥] AASHTO, "Standard method of test for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate," 2011.
- [٣٦] T. AASHTO, "Resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine".
- [٣٧] F. ASTM, "D4318 [AASHTO T89/90]–Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," ed.
- [٣٨] T. AASHTO, "176–08," *Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test*.
- [٣٩] T. Mandal, T. B. Edil, and J. M. Tinjum, "Study on flexural strength, modulus, and fatigue cracking of cementitiously stabilised materials," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 19, no. 7, pp. 1546-1562, 2018.
- [٤٠] F. Aragão and Y.-R. Kim, "Mode I fracture characterization of bituminous paving mixtures at intermediate service temperatures," *Experimental mechanics*, vol. 52, no. 9, pp. 1423-1434, 2012.
- [٤١] M. AASHTO, "Standard specification for performance-graded asphalt binder," *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1998.

Abstract:

Asphalt overlay is one of the most common methods for pavement maintenance. But the most important defect of this method is the diffusion and reflection of the failures and cracks in the underlying pavement into the overlay, which are referred to as reflection cracking. There are several factors that influence the occurrence of reflection cracking, so it cannot be completely prevented from its diffusion, it can only be postponed using a variety of solutions and slow down their growth and diffusion. Various studies have been conducted to delay the growth of these cracks and extend the service life of asphalt overlays. One of the most commonly used methods that the researchers have considered and has shown acceptable performance is the use of a crack relief interlayer between the existing cracked pavement layer and the overlay. For this purpose, geosynthetic products or a layer of sand asphalt are used. Today, due to the scarcity of energy resources, the economic and environmental role of reusing renewable materials is more and more important. These materials can also be used as interlayer in asphalt pavements. In this thesis, three-point bending test is used to investigate the effect of using these interlayers. The performance of four different interlayer types in asphalt samples compared to control samples. The interlayers used are: Sand asphalt interlayer, cement-stabilized base interlayer, reclaimed asphalt pavement (RAP) interlayer and bitumen-stabilized RAP interlayer. Laboratory samples were prepared in three layers, including the underlying cracked layer, interlayer and the overlay, and control samples were prepared in two layers, including the underlying cracked layer and the overlay. Three modes were considered for cracking location: middle cracks, dual cracks and lateral cracks in the underlying cracked layer. The purpose of this study was to investigate the effect of interlayer type, loading rate and crack location on asphalt mix fracture parameters. The results showed that between four interlayers used, bitumen-stabilized RAP interlayer performed better and the fracture force in the samples with bitumen-stabilized RAP interlayer is higher than other samples But its fracture energy is lower due to less deformation than sand asphalt interlayer, which can increase the bitumen required for stabilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) or use bitumen rejuvenating materials.

Keywords: Reflection cracking, crack relief interlayer, Reclaimed asphalt pavement, RAP, Cement-stabilized base, Fracture energy, Fracture toughness



Shahrood University of Technology
Department of Civil Engineering

**Investigating the Effect of Crack Relief Interlayer in Asphalt
Pavement**

By:

Hadi Baghani

Supervisors:

Dr. Iman Aghayan

Dr. Ali Hosseini

January 2020