

ارزیابی اثر وجود آلاینده‌های مختلف بر عملکرد چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی

محمد مهدی خبیری*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

مجتبی مرادی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۳۰ - پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۲

چکیده

از جمله عوامل مهم در افزایش طول عمر روسازی‌های آسفالتی، توجه به اجرای صحیح لایه‌های آسفالتی می‌باشد. لایه‌های بیندر و توپکا جزو اولین لایه‌های مرتبط با وزن وسایل نقلیه می‌باشند که به وسیله اندود سطحی به یکدیگر متصل می‌شوند. عبور وسایل نقلیه منجر به ایجاد نیروی برشی در ناحیه اتصال بین دو لایه می‌شود که در صورت نبود مقاومت کافی، خرابی‌هایی در سطح روسازی به وقوع می‌پیوندد، که شامل جمع‌شدگی روسازی، وقوع ترک‌های طولی و عرضی و همچنین ایجاد چاله می‌باشند. این تحقیق، به صورت فرایند آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی انجام گرفته است. در فرایند آزمایشگاهی، ابتدا نمونه‌ها در دو لایه بیندر و توپکا ساخته شده و سپس از آلاینده‌های خرده لاستیک، خاک، خرده چوب و الیاف در اندود سطحی بین دو لایه بیندر و توپکا، به منظور بررسی اثر هر یک از آلاینده‌ها بر مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای، استفاده شده است. نمونه‌ها درون فک نگه‌دارنده برای ثابت نگه‌داشتن لایه بیندر قرار داده شدند. سپس تحت تأثیر نیروی قائم، ناشی از دستگاه بارگذاری برشی در ناحیه توپکا، قرار گرفتند. در فرایند مطالعه عددی، اقدام به مدل‌سازی روسازی در حالت واقعیت شده است. در این فرایند، با مدل‌سازی سطح جاده و عبور وسیله نقلیه شبیه‌سازی شده، شرایط مختلف وجود آلاینده‌ها در بین دو لایه بیندر و توپکا بررسی شده است. در فرایند مدل‌سازی، با تغییر در پارامترهای ضخامت لایه توپکا، سرعت عبور وسیله نقلیه و ضریب چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا، نیروی چسبندگی بین‌لایه‌ای در حالات ایجاد شده بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان داد که در بین تمامی حالت‌های بررسی شده، نمونه ساخته شده با حد پایین دانه‌بندی، که از پودر لاستیک به‌عنوان آلاینده در بین دو لایه بیندر و توپکا استفاده شده بود، با افزایش مقاومت به میزان ۱/۱ برابر مقاومت در حالت قیر بدون آلودگی، علاوه بر اینکه باعث کاهش مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای نشده است، بیشترین مقاومت چسبندگی را نیز به‌دست آورده است.

واژه‌های کلیدی: ناحیه چسبندگی، دستگاه بارگذاری، اندود سطحی، نیروی برشی، مدل‌سازی عددی، آلاینده سطح روسازی

۱. مقدمه

می‌باشد. در روند شناخت این پارامتر بر مقاومت

روسازی، بررسی تعیین و افزایش ضریب اصطکاک بین دو لایه و به دنبال آن تنش اصطکاکی در آن نقطه بسیار

بررسی اثر چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا از جمله مهم‌ترین پارامترها در شناخت طول عمر روسازی

مختلف بر چسبندگی بین‌لایه‌ای را بررسی کرده است. نتایج نشان داد که نبود اندود مناسب، مقاومت بین‌لایه‌ای را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش میزان اندود بیش از مقدار بهینه سبب کاهش مقاومت بین‌لایه‌ای می‌شود. تحقیقاتی که توسط ویت (۲۰۰۷) از دانشگاه کانزاس در زمینه رفتار برشی بین‌لایه‌ای صورت گرفت منتج به این شد که مقاومت برشی بین دو لایه تا حد زیادی بستگی به شرایط سطح دو لایه آسفالتی، نسب به اندود بین دو لایه دارد. مهتا (۲۰۰۷) از سازمان حمل‌ونقل ویسکانسین، تحقیقی در زمینه مقاومت بین‌لایه‌ای انجام داد. نتایج نشان داد که نسبت سختی بین دو لایه بر ترک‌خوردگی و شکست بین‌لایه‌ای تأثیرگذار می‌باشد. این مطالعه نشان داد که نسبت سختی بین دو لایه که تحت تنش اضافی نمی‌باشند، بیشتر از سختی بین دو لایه در حالتی که تحت تنش اضافی می‌باشد، است و ظرفیت باربری بین‌لایه‌ای در لایه‌های با سختی کم را می‌توان با افزایش سختی لایه‌ها، از طریق افزایش ضخامت لایه‌ها، افزایش داد. فروتی و همکاران (۲۰۱۶) در زمینه بهبود مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای بررسی‌هایی انجام دادند. در این تحقیقات، با استفاده از الیاف شیشه‌ای تقویت شده با شبکه پلیمری و یک شبکه فیبر کربن، مقاومت چسبندگی بین دو لایه تحت اثر شرایط متغیر دما، زمان بارگذاری و فشار بررسی شد. نتایج نشان داد که این الیاف سبب افزایش مقاومت برشی در نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های تقویت نشده گردیده است.

زیاری و خبیری (۲۰۰۷) تحقیقی در زمینه اثر اصطکاک بین‌لایه‌ای در کاهش عمر روسازی‌های انعطاف‌پذیر انجام دادند. بر اساس نتایج، به علت وجود لغزش در بین لایه‌ها به علت ضعیف بودن اصطکاک داخلی بین‌لایه‌ای، عمر روسازی کاهش می‌یابد. میزان کاهش عمر روسازی به نوع روسازی و شرایط

مهم می‌باشد. در اثر نبود اصطکاک کافی بین دو لایه بیندر و توپکا در بعضی نواحی از مسیر راه که با کاهش سرعت همراه می‌باشد (مثل محل‌های توقف و دوربرگردان) جمع‌شدگی آسفالت در آن ناحیه و به دنبال آن خرابی سطح روسازی به‌وقوع می‌پیوندد. از همین رو، این تحقیق با هدف بررسی تأثیر آلاینده‌های مختلف بر مقاومت چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا، سعی در شناخت مناسب‌ترین حالت برای اجرای صحیح این دو لایه و همچنین بررسی تأثیر وجود آلاینده‌های مختلف در هنگام اجرای دو لایه بیندر و توپکا بر سطح تماس آنها دارد. در این مطالعه، مواد زائدی که روی سطح روسازی قرار می‌گیرند و می‌توانند به عنوان مانع چسبندگی دو لایه باشند، به عنوان آلاینده^۱ تعریف می‌شوند.

۲. پیشینه تحقیق

راپوسیراس و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقی در زمینه عوامل مؤثر در تجزیه و تحلیل شرایط بین‌لایه‌ای انجام دادند. در این تحقیق، ثابت شد که عواملی همچون نوع اندود سطحی، نوع مخلوط، ویژگی‌های سطح رویه، دما و نوع ماده چسباننده در افزایش چسبندگی بین‌لایه‌ای مؤثر می‌باشد. وست و همکاران (۲۰۰۵) از مؤسسه بین‌المللی تکنولوژی آسفالت، تحقیقی در زمینه چسبندگی بین دو لایه انجام دادند. در این تحقیق، ثابت شد که افزایش دما باعث کاهش قابل توجهی در مقاومت بین دو لایه می‌شود. در این تحقیق، بیشترین مقاومت در حالت خوب دانه‌بندی شده و کمترین مقاومت در حالت دانه‌بندی یکنواخت به وقوع پیوسته است. در سال ۲۰۰۶، تحقیقی توسط تاشمن و همکاران از اداره حمل‌ونقل واشنگتن در زمینه چسبندگی بین لایه‌های آسفالت صورت گرفت. این مطالعه، تأثیر عوامل

^۱ - Contaminant

شده از سنگدانه گرانیته و اندود سطحی پلیمری بین دو لایه آسفالتی، مقاومت برشی و ترک خوردگی انعکاسی بین دو لایه بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اندود سطحی پلیمری بین دو لایه سبب افزایش مقاومت برشی بین‌لایه‌ای شده است. همچنین، آسفالت ساخته شده از سنگدانه گرانیته ترک‌های انعکاسی را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهد.

دیاخت و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقی در رابطه با بررسی آزمایشگاهی عملکرد خستگی اندود سطحی انجام دادند. در این تحقیق، به بررسی عملکرد خستگی بین دو لایه پرداخته شده و مدل شکستی برای ارزیابی پارامتر طول عمر روسازی ارائه شده است. تجزیه و تحلیل روابط به‌کار رفته در این آزمایش منجر به پیدا شدن یک پارامتر کلیدی در توصیف شرایط روسازی و ارزیابی دوام روسازی شده است. کانستراری و همکاران (۲۰۱۲) تحقیقی در مورد آزمون‌های مکانیکی در زمینه پیوند بین‌لایه‌ای در آسفالت انجام دادند. در این تحقیق، با انجام آزمایش روی نمونه‌ها، حداکثر تنش برشی و جابه‌جایی لایه‌ها اندازه‌گیری شد و مقاومت برشی به‌عنوان تابعی از پارامترهایی مثل قطر نمونه، دمای آزمایش و سرعت بارگذاری معرفی گردید. راب و همکاران (۲۰۱۲) تحقیقی در زمینه آزمون‌های پیوند بین‌لایه‌ای آسفالت انجام دادند. در این تحقیق، با استفاده از ساخت نمونه آزمایشگاهی به‌وسیله سنگدانه‌های ایده‌آل که شامل توپ‌های فلزی و فیر خالص می‌باشد، اثبات شد که در چنین حالتی نرخ جابه‌جایی و تغییرشکل کندتر از حالت واقعی شده و همچنین تنش بین‌لایه‌ای نیز نسبت به حالت واقعی کاهش یافته است. در تحقیق کوریا و همکاران (۲۰۱۴) که در مورد تأثیر اندود سطحی بر خواص ژئوسینتتیک روسازی انجام شد، با به‌دست آوردن درصد قیر بهینه برای اندود بین‌لایه‌ای آسفالت و استفاده از این درصد قیر بهینه برای اندود بین‌لایه‌ای، افزایش تنش برشی بین دو لایه به

بین‌لایه‌ای که در آن‌ها اصطکاک داخلی وجود دارد، وابسته می‌باشد. کولاپ و همکاران (۲۰۰۹) تحقیقی در زمینه مقاومت برشی بین‌لایه‌ای آسفالت داشتند. در این تحقیق، به اندازه‌گیری پارامترهای مرتبط با مقاومت برشی بین‌لایه‌ای پرداخته شده است. در این تحقیق به این نتیجه رسیده شد که مقاومت برشی بین‌لایه‌ای برای لایه بیندر با تغییر پارامتر دانه‌بندی و اندود میانی لایه‌ها و برای لایه توپکا با تغییر دانه‌بندی تغییر می‌کند. آندرا و توزو (۲۰۱۲) تحقیقی در مورد ارزیابی شکست برشی بین‌لایه‌ای انجام دادند و با تجزیه و تحلیل رابطه میان چندین عامل مکانیسم شکست به این نتیجه رسیدند که میزان بار قائم وارد شده بر یک سطح به‌طور مستقیم روی مقاومت برشی بین‌لایه‌ای تأثیر می‌گذارد و حداکثر تنش برشی ایجاد شده در نمونه‌ها در اولین لحظه جابه‌جایی بین دو لایه می‌باشد.

چان و همکاران (۲۰۱۵) تحقیقی روی اثر چسبندگی بین‌لایه‌ای انجام دادند. در این تحقیق، اثبات شد که شرایط پیوند بین‌لایه‌ای نقش مؤثری در سیستم باربری سازه‌ای روسازی آسفالتی و همچنین عمر روسازی آسفالتی بازی می‌کند. نتایج تحقیق دستری و همکاران (۲۰۱۵) در مورد میزان تأثیر اندود سطحی بر چسبندگی بین‌لایه‌ای بیانگر این موضوع بود که رابطه مستقیمی میان نوع ماده چسباننده بین دو لایه و نحوه آماده‌سازی لایه‌های روسازی با استحکام چسبندگی بین دو لایه برقرار می‌باشد. سون (۲۰۱۱) از دانشگاه فلوریدا، تحقیقی در زمینه مدل‌سازی تأثیر شرایط بین‌لایه‌ای بر ترک خوردگی انعکاسی داشت. در این تحقیق، مشخص شد که شرایط بین‌لایه‌ای تأثیر مستقیمی بر ترک خوردگی انعکاسی روسازی آسفالتی دارند. به‌گونه‌ای که عدم چسبندگی مناسب سبب شدت ترک‌های انعکاسی می‌شود. دسوزا گاسپا و همکاران (۲۰۱۶) تحقیقی در مورد بهبود ترک خوردگی انعکاسی انجام دادند. در این تحقیق، با استفاده از آسفالت ساخته

اثر اجرای نامناسب دولایه بیندر^۲ و توپکا^۳ در سطح روسازی ایجاد می‌شوند می‌توان به وقوع جمع‌شدگی در سطح روسازی، ایجاد ناهمواری روی سطح روسازی، وقوع ترک‌های انعکاسی، وقوع ترک‌های طولی و عرضی و در بلندمدت به وجود آمدن چاله اشاره کرد. از همین رو، توجه به نوع ساختار بین‌لایه‌ای رویه‌های آسفالتی که شامل نوع سنگدانه به‌کار رفته در ساخت رویه‌های آسفالتی و همچنین نوع اندود به‌کار رفته در بین دو لایه می‌باشد، به‌منظور کاهش اثر خرابی‌های زودرس روسازی ناشی از عبور وسایل نقلیه و در پی آن تصادفات سطح جاده، به دلیل خرابی سطح روسازی، بسیار مهم می‌باشد. این بهسازی‌ها در بلندمدت کاهش هزینه‌های مرمت و نگهداری روسازی و هزینه‌های تصادفات جاده‌ای را به دنبال دارد.

۴. فرضیات تحقیق

با توجه به تحقیقاتی که در سالیان گذشته صورت گرفته است، در این تحقیق سعی شده که به‌طور همزمان، با استفاده از تغییر دادن دو پارامتر دانه‌بندی و اندود سطحی در ساخت نمونه‌ها و سپس بارگذاری نمونه‌ها، نیروهای برشی بین دو لایه به‌دست آورده شود (شکل ۱) و با استفاده از رابطه (۱) تنش برشی وارد بر ناحیه چسبندگی بین دو لایه تعیین گردد (وست و همکاران، ۲۰۰۵). در انتها، مناسب‌ترین گزینه که تحت تأثیر عوامل سرعت، نوع اندود سطحی و دانه‌بندی می‌باشد، به کمک مدل‌سازی، برای اجرای لایه‌های بیندر و توپکا مشخص گردد. تحقیقات نشان داده که هر کدام از عوامل فوق در محدوده اثر خود، تأثیرات متفاوتی را بر چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا می‌گذارند.

وقوع پیوسته است. بر اساس تحقیق لی و همکاران (۲۰۱۶) در مورد ارزیابی آزمایشگاهی مصالح به‌کار رفته در بین لایه‌های روسازی آسفالتی، با کاربرد قیر پلیمری به‌عنوان اندود بین‌لایه‌ای، مقاومت برشی بین دو لایه بیندر و توپکا افزایش یافت.

کاظمی و رهبر (۲۰۱۵) تحقیقی در زمینه مدل‌سازی عددی تأثیر چسبندگی بین‌لایه‌ای روسازی-های آسفالتی در خرابی روسازی انجام دادند، و با تحلیل‌های انجام شده به این نتیجه رسیدند که با کاهش ضریب اصطکاک بین‌لایه‌ای، تغییر شکل بین‌لایه‌ای افزایش می‌یابد که این عامل منجر به خرابی سطح روسازی می‌گردد.

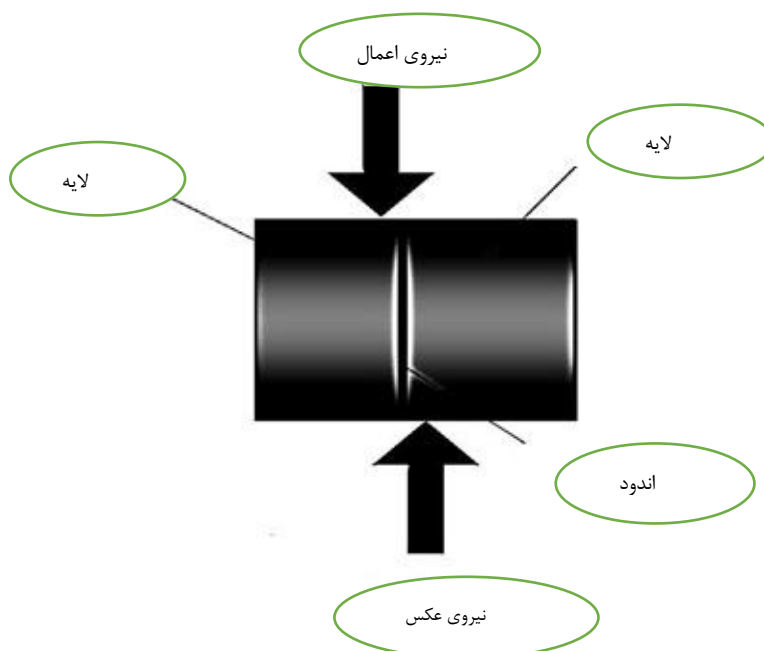
۳- اهمیت تحقیق

این تحقیق، با بررسی مقاومت اصطکاکی تحمل شده در شرایط مختلف اجرای روسازی‌های بیندر و توپکا، سعی کرده است که مناسب‌ترین شرایط را برای اجرای این دو لایه معرفی کند. در بسیاری از پروژه‌های ساخت روسازی‌های آسفالتی، لایه‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از یک لایه اندود سطحی (مانند چسبنده‌های قیری، امولسیون قیری و قیرهای محلول) به همدیگر چسبانیده می‌شوند (کاظمی و رهبر، ۱۳۹۴). در بسیاری از موارد، اندود سطحی^۱ بین دو لایه می‌تواند خطر گسیختگی زودرس روسازی، به علت کاهش چسبندگی بین لایه‌های آسفالتی، را حذف و یا کاهش دهد (کاظمی و رهبر، ۱۳۹۴). به‌طور کلی، پیوند ضعیف بین دو لایه بیندر و توپکا منجر به ایجاد خرابی بین‌لایه‌ای می‌شود. شواهد حاکی از این است که این خرابی‌ها به دلیل عبور بار با سرعت و وزن زیاد و همچنین ضعیف بودن پیوند بین دو لایه می‌باشد (زیاری و خبیری، ۲۰۰۷). از جمله خرابی‌هایی که در

2- Binder

3- Topeka

1_ Tack coat



شکل ۱. اثر بارگذاری وارد شده بر مقاومت چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا

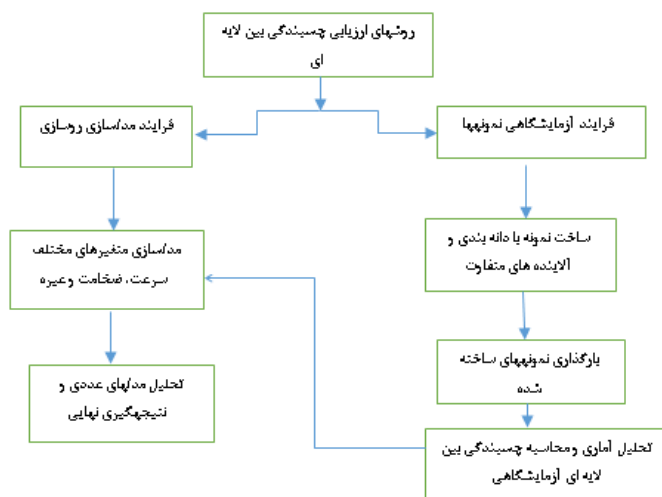
$$S_b = \frac{P_{Max}}{A} = \frac{P}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (1)$$

استفاده شده است (شکل ۲). در روش اول، که با استفاده از فرایند آزمایشگاه انجام پذیرفته، بر اساس دو نوع دانه‌بندی سطح بیندر و سطح توپکا و سپس استفاده از پنج نوع اندود سطحی بین دو لایه، اقدام به ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی شده است.

که S_b تنش برشی (پاسکال)، P_{MAX} بیشترین نیروی تحمل شده توسط نمونه (نیوتن)، A سطح مقطع نمونه (میلی متر مربع) و D قطر نمونه (میلی متر) است.

۵. روش تحقیق

در این تحقیق، از دو شیوه برای بررسی موضوع



شکل ۲. گردش کار روش اجرای تحقیق حاضر

سازی عددی، اثر وجود آلاینده‌های مختلف بر مقاومت چسبندگی بین‌لایه‌ای بررسی شده است.

۵-۱. مشخصات مصالح سنگدانه‌ای

در این تحقیق، برای تهیه مصالح سنگی، از سنگدانه‌های آهکی که به دلیل فراوان بودن در کشور، به‌طور عمده مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده شده است. مصالح سنگدانه‌ای در سه بخش درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر طبقه‌بندی شده است. خصوصیات این مصالح بر اساس مشخصات مصالح سنگدانه‌ای که در نشریه مشخصات عمومی راه و ابنیه در محدوده مجاز قرار گرفته (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۱)، در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

دلیل استفاده از دو نوع دانه‌بندی در ساخت نمونه‌ها، وجود ریزدانه بیشتر در ساختار دانه‌بندی توپکا و ایجاد سطح یکنواخت‌تر آسفالتی در رویه توپکا می‌باشد. استفاده از اندودهای سطحی متفاوت به دلیل مدل‌سازی آزمایشگاهی، شرایط مختلف اجرای دو لایه بیندر و توپکا و همچنین بهبود چسبندگی بین این دو لایه می‌باشد. در انتها، نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش اصطکاک تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. در فرایند مدل‌سازی نرم‌افزاری، ابتدا ساختار سطح روسازی در حالت واقعیت مدل سازی شده است. سپس، با تغییر در پارامترهای ضخامت لایه توپکا، سرعت عبور وسیله نقلیه و ضریب چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا، حالات مختلف مدل‌سازی اجرا شده است. در نهایت، با بررسی نتایج آزمایشگاهی و مدل-

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی درشت‌دانه مورد استفاده در تهیه مصالح تحقیق حاضر (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۱)

شرح	آستر	رویه	سنگدانه آزمایش	استاندارد آزمایش
			اشتو	ای اس تی
			م	
حداکثر سایش به روش لس‌آنجلس (%)	۳۰	۲۵	۲۱	T۹۶ C۱۳۱
حداکثر افت وزنی با سولفات سدیم (%)	۸	۸	۶۷	T۱۰۴ C۸
حداکثر جذب آب (%)	۲/۸	۲/۵	۱/۹	T۸۵ C۱۲۷
حداکثر درصد سنگ‌دانه‌های پهن و دراز	۱۵	۱۵	۱۰	- D۴۷۹۱

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی ریزدانه و فیلر مورد استفاده در تهیه مصالح تحقیق حاضر (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۱)

استاندارد آزمایش		سنگدانه	رویه	آستر	شرح
ای اس تی ام	اشتو	آزمایش			
مصالح ریزدانه					
D۴۳۱۸	T۹۰	-	غیر پلاستیک	غیر پلاستیک	حداکثر نشانه خمیری PI (%)
-	-	-	-	-	حداکثر حد روانی (%)
C۸۸	T۱۰۴	۹/۵	۱۲	۱۲	حداکثر افت وزنی با سولفات سدیم (%)
C۱۲۸	T۸۴	۲	۲/۵	۲/۸	حداکثر جذب آب (%)
D۲۴۱۹	T۱۷۶	۳۹	۵۰	۵۰	حداقل ارزش ماسه‌ای (ماسه طبیعی و شکسته) قبل از ورود به کارخانه آسفالت (%)
-	-	۱۵/۳	-	۲۰	حداکثر مجاز وزنی ماسه طبیعی نسبت به مصالح رد شده از الک شماره ۴ دانه‌بندی (%)
مخلوط مصالح درشت، متوسط، ریز و فیلر					
حداکثر نشانه خمیری مصالح رد شده از الک ۲۰۰ در صورت عدم استفاده از سیمان یا آهک شکفته به‌عنوان فیلر (%)					
D۴۳۱۸	T۹۰	۲/۷	۴	۴	

ترافیک سنگین $EAL \geq 10^7$ در نظر گرفته شده است (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۱).

۵-۳-۱. دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای

برای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی از دو نوع دانه‌بندی استفاده شده است. دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ که مربوط به دانه‌بندی بیندر و توپکا برای سطح بیندر و دانه‌بندی شماره ۵ نشریه شماره ۱۰۱ که مربوط به دانه‌بندی سطح توپکا است، برای سطح توپکا استفاده شده است. مشخصات هر کدام از این دو نوع دانه‌بندی در جدول ۳ آمده است.

۵-۲. ارزیابی قیر

در این تحقیق، از قیر ۶۰-۷۰ که در کارخانه قیر اصفهان تولید شده، استفاده شده است. این قیر به دلیل ویژگی‌هایی که دارد به‌طور عمده در کارهای راه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. درجه نفوذ مناسب این نوع قیر سبب شده که به‌طور انبوه، به‌ویژه در مناطق با آب و هوای گرم و خشک، مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۳. طرح اختلاط

در این تحقیق، با توجه به متداول بودن روش مارشال (T245) و امکانات آزمایشگاهی موجود، از این روش استفاده شده است. میزان ترافیک وسایل نقلیه

جدول ۳. دانه‌بندی بیندر و توپکا (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۱)

شماره الک (mm)	دانه‌بندی شماره ۴ (سطح بیندر)		دانه‌بندی شماره ۵ (سطح توپکا)		شماره الک (mm)
	باقی مانده حد بالا دانه‌بندی	وسط دانه‌بندی	باقی مانده حد بالا دانه‌بندی	وسط دانه‌بندی	
	(%)	(%)	(%)	(%)	
۱۹	۰	۰	۰	۰	۱۹
۱۲/۵	۰	۵	۰	۱۰	۱۲/۵
۹/۵	۰	۰	۰	۵	۹/۵
۴/۷۵	۲۶	۳۶	۱۵	۲۵	۴/۷۵
۲/۳۶	۱۶	۱۶	۱۸	۲۰/۵	۲/۳۶
۰/۳	۳۷	۳۰	۴۴	۳۴/۵	۰/۳
۰/۰۷۵	۱۱	۷	۱۳	۹	۰/۰۷۵
فیلر	۱۰	۶	۱۰	۶	فیلر

۲-۳-۵. تعیین درصد قیر بهینه

برای تعیین درصد قیر بهینه، از درصد‌های قیر ۴، ۵، ۵/۵، ۶ و ۷ استفاده شده است. با توجه به تجربیات محلی کارگاه تأمین مصالح در زمینه تهیه آسفالت و همچنین توجه به این نکته که اغلب درصد‌های قیر بهینه آسفالت‌های تهیه شده توسط این کارگاه بین ۴/۵ تا ۵/۵ درصد قرار داشته است، از ۵٪

قیر (۱٪ کمتر و ۱٪ بیشتر از درصد‌های قیر معمول) استفاده شده است. بعد از آماده‌سازی مصالح و تراکم کردن آن‌ها به وسیله ۷۵ ضربه چکش تراکم مارشال (به دلیل ترافیک سنگین)، نمونه‌ها تحت آزمایش مارشال قرار گرفته‌اند. نتایج درصد‌های قیر بهینه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. درصد قیر بهینه برای لایه روسازی

درصد قیر بهینه برای لایه توپکا			درصد قیر بهینه برای لایه بیندر		
حد پایین دانه‌بندی	حد وسط دانه‌بندی	حد بالای دانه‌بندی (%)	حد پایین دانه‌بندی (%)	حد وسط دانه‌بندی (%)	حد بالای دانه‌بندی (%)
۴/۴۵	۵/۶	۵/۸	۴/۷۵	۴/۹	۵/۱

۴-۵. تهیه نمونه‌های آزمایش

تئوری ساخت نمونه آزمایشگاهی و فرایند نیروی برشی در محل چسبندگی دو لایه بر اساس ساخت نمونه آزمایشگاهی در تحقیقات گذشته می‌باشد. در مطالعاتی که در دانشگاه کانزاس در سال ۲۰۰۷ برای بررسی چسبندگی بین‌لایه‌های آسفالتی به کار گرفته شد، نمونه‌هایی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر مورد استفاده

دلیل کاهش درصد قیر بهینه، تغییرات سنگدانه‌های ریزدانه در مخلوط آسفالتی می‌باشد. مرتضوی و طاهرخانی (۱۳۹۱) نیز در پی تحقیقی نشان دادند که درصد قیر بهینه به دست آمده از آزمایش استقامت مارشال برای مخلوط‌های درشت‌دانه کمتر از مخلوط‌های ریزدانه می‌باشد.

ماده در افزایش مقاومت چسبندگی در محل اتصال دو لایه آسفالتی می‌باشد. طبق مطالعات اخیر، الیاف اضافه شده به قیر باعث افزایش نیروی بیرون کشیدگی^۱ از قیر می‌شود. همچنین، معتمد زرگر و فائزی (۱۳۹۳) تحقیقی در زمینه تأثیر الیاف بر مقاومت آسفالت انجام دادند که نشان‌دهنده تأثیر زیاد این مواد در افزایش مدول برجهندگی، مقاومت تحمل شده توسط آسفالت و مقاومت کششی بوده است.

میزان قیر استفاده شده برای اندود سطحی برابر با ۱۰ گرم و وزن هر کدام از مواد آلاینده به‌کار رفته در بین لایه‌ها برای هر نمونه برابر با ۲ گرم می‌باشد. میزان اندود سطحی طبق استانداردهای ملی ۲۰۰ تا ۴۰۰ گرم در هر متر مربع می‌باشد (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۱). از این رو، به منظور پخش اندود سطحی روی مرز بین دو لایه، به ۳/۱۵ گرم قیر نیاز است. لذا، با توجه به ساخت نمونه آزمایشگاهی با میزان اندود سطحی ۳/۱۵ گرم و بارگذاری نمونه برای قابل اندازه‌گیری بودن نیروی چسبندگی بین دو لایه تصمیم به تغییر در میزان اندود سطحی گرفته شد و از میزان ۱۰ گرم قیر برای اندود سطحی برای تمامی نمونه‌ها استفاده شد. از سوی دیگر، از ۲ گرم آلاینده به دلیل پوشش کامل سطح نمونه و بررسی بحرانی‌ترین حالت چسبندگی بین دو لایه استفاده گشته است.

در این تحقیق، با توجه به اندک بودن نیروی چسبندگی در ساخت نمونه آزمایشگاهی با قیر امولسیون و با وزن استاندارد، تصمیم گرفته شد برای ساخت نمونه‌ها از قیر خالص و مقدار بیشتر، ولی یکسان در تمامی نمونه‌ها، استفاده گردد (پارامتر ثابت در این مطالعه). مصالح بیندر در ابتدا در درصد قیر بهینه آماده شده و تحت اثر ۷۵ ضربه چکش تراکم مارشال متراکم گردید. سپس، بعد از یک بازه زمانی یک روزه، اندود سطحی روی مخلوط آسفالتی بیندر پخش گردید.

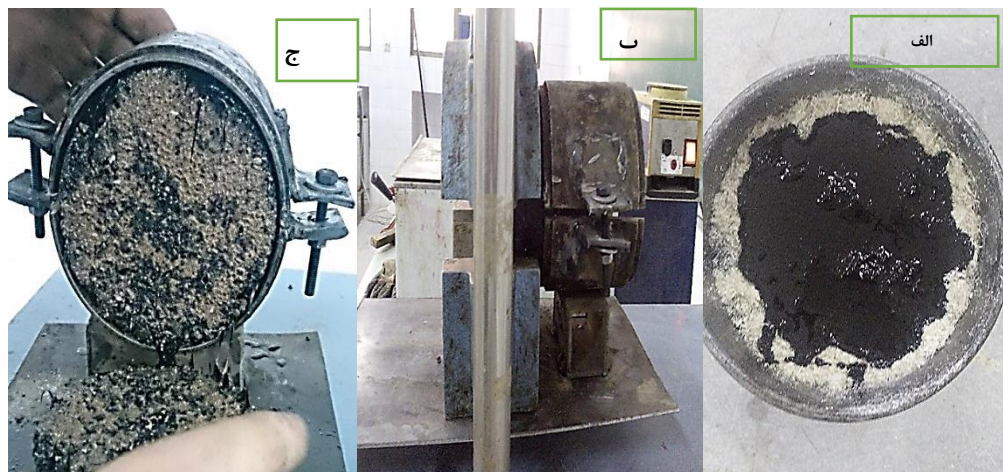
قرار گرفت، که ۷ سانتی‌متر آن بیندر و ۳ سانتی‌متر آن توپکا بوده است (ویت، ۲۰۰۷). تهیه نمونه بر این اساس می‌باشد که نمونه‌ها در دو لایه جداگانه بیندر و توپکا ریخته شده و متراکم می‌شوند. سپس تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در تهیه نمونه‌ها، ضخامت بیندر برابر با ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و به دلیل این که بیندر در فک نگه‌دارنده قفل می‌شود و عملاً نیروی مستقیمی به آن وارد نمی‌شود، ضخامت آن نسبت به ضخامت لایه بیندر به‌کار گرفته شده در تحقیقات دانشگاه کانزاس کمتر در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه توپکا نیز مطابق با تحقیقات ویت (۲۰۰۷) ۳ سانتی‌متر منظور شده است. به‌منظور بررسی تأثیر اندود سطحی بین دو لایه بیندر و توپکا در شرایط مختلف، پنج حالت زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- اندود سطحی فقط شامل قیر بدون آلودگی باشد.
- یک لایه نازک خرده لاستیک روی سطح بیندر ریخته و سپس اندود سطحی ریخته شود. دلیل استفاده از این مصالح، باقیمانده ذرات خرده لاستیک چرخ‌های لاستیکی در حین عبور و متراکم کردن در سطح بیندر می‌باشد.
- یک لایه نازک خاک ماسه بادی روی سطح بیندر ریخته و سپس اندود سطحی ریخته شود. دلیل استفاده از این ماده، گرد و خاک‌های حمل شده و پخش شده توسط باد روی سطح بیندر، مانند مناطق کویری، می‌باشد.
- یک لایه نازک خرده چوب روی سطح بیندر ریخته و سپس اندود سطحی ریخته شود. دلیل استفاده از این ماده، شبیه‌سازی جاده عبوری از مناطق جنگلی و بوته-زار می‌باشد.
- یک لایه نازک الیاف معدنی روی سطح بیندر ریخته و سپس اندود سطحی ریخته شود. از این نوع ماده به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده در چسبندگی بین دو لایه استفاده شده است. دلیل استفاده از الیاف، تأثیر این

¹ - Pull out

مطابق با دو روش پیشین، با مهار کردن نمونه آسفالتی در یک فک نگه‌دارنده و اعمال نیروی قائم، تنش برشی بین دو لایه به دست می‌آید (وست و همکاران، ۲۰۰۶). قبل از انجام آزمایش، تمامی نمونه‌ها درون آب گرم ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه، به منظور ایجاد بحرانی‌ترین حالت آب و هوایی، قرار داده می‌شود. برای انجام آزمایش از دستگاه مقاومت مارشال استفاده شده است. به منظور ثابت نگه‌داشتن لایه بیندر، از یک فک نگه‌دارنده استفاده شده است. ابتدا قسمت بیندر را درون فک نگه‌دارنده قرار داده و آن را ثابت نگه داشته، و سپس نمونه در زیر دستگاه بارگذاری قرار می‌گیرد. اختلاف ارتفاع بین فک نگه‌دارنده و قالب مارشال مانع از قفل شدن فک بالایی و پایینی قالب مارشال شده و از این طریق می‌توان نیروی برشی (اصطکاکی) بین دو لایه را به دست آورد (شکل ۳).

در انتها، مصالح توپکا روی لایه بیندر و اندود سطحی ریخته شده و به وسیله چکش تراکم، متراکم گردید. در تحقیقی که در سال ۱۹۹۹ توسط رومانوشی صورت گرفت، از یک فک نگه‌دارنده استفاده شده بود که با قرار دادن نمونه درون فک و اعمال بار عمودی بر لایه توپکا، مقاومت برشی وارد شده در بین دو لایه قابل اندازه‌گیری بوده است. روش دیگری که توسط مرکز فناوری آسفالت واشنگتن به کار گرفته شده بود، شامل قرار دادن نمونه آسفالتی درون فک نگه‌دارنده و غیر هم سطح قرار دادن لایه توپکا با فک پایین بوده است، که با اعمال نیروی عمودی، میزان مقاومت برشی بین دو لایه قابل اندازه‌گیری گردید. این روش هم‌اکنون نیز در اداره تحقیقات راه و حمل و نقل ایالت فلوریدا به منظور بررسی چسبندگی بین دو لایه به کار گرفته می‌شود (رومانوشی، ۱۹۹۹). روش دیگری که توسط مرکز بین‌المللی تحقیقات آسفالت به کار گرفته شده،



شکل ۳. الف) پخش آلاینده و فیر روی سطح بیندر، ب) شیوه بارگذاری نمونه و ج) جدا شدن دو لایه آسفالتی

افزایش یافته و سپس به تدریج تا جدا شدن کامل دو لایه مطابق شکل ۳ کاهش می‌یابد. در جدول ۵، مقاومت اصطکاکی نهایی برای حالت‌های مختلف چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا آمده است.

۶. ارائه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

با قرار دادن نمونه‌ها در زیر دستگاه مارشال و روشن کردن دستگاه، نیروی مقاومت اصطکاکی که باعث گیرش دو لایه به همدیگر شده است، ابتدا

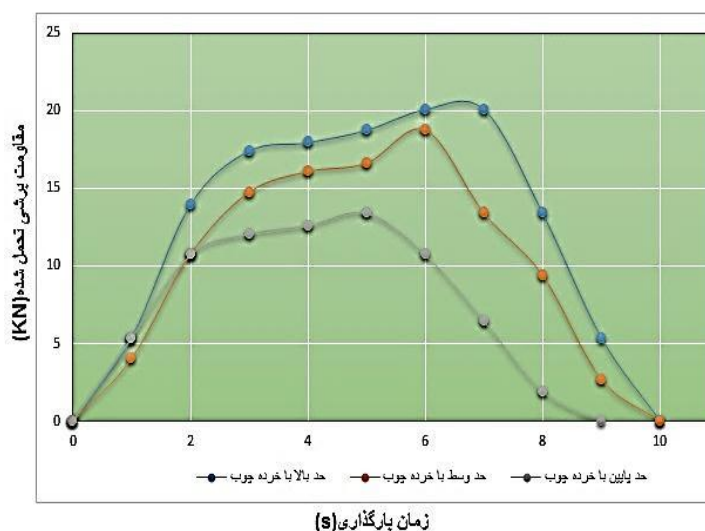
جدول ۵. مقاومت نهایی اصطکاکی بین دو لایه بیندر و توپکا (بر حسب KN)

نمونه	حد بالای دانه‌بندی	حد وسط دانه‌بندی	حد پایین دانه‌بندی
بدون آلودگی	۱۸/۷۶	۱۶/۱	۲۲
قیر و خرده لاستیک	۲۴/۱۲	۵/۳۶	۲۴/۱۲
قیر و خاک	۵/۶۳	۷/۲۳	۱۶/۱
قیر و الیاف	۱۵/۵۵	۱۶/۱	۲۱/۴۴
قیر و خرده چوب	۲۰/۱۱	۱۸/۷۶	۱۳/۴

۱-۶ بدون آلودگی

شکل ۴ میزان تغییرات نیروی اصطکاکی را برای نمونه‌ای که از قیر (بدون آلودگی) برای چسبندگی بین دو لایه استفاده شده است، نشان می‌دهد. همان طور که از نمودار مشخص می‌باشد، بیشترین میزان نیروی اصطکاکی در نمونه با حد پایین سنگدانه بیندر و توپکا به وجود آمده است. همچنین، مدت زمان مقاومت نمونه

نیز نسبت به دو حالت دیگر در حد متعادل‌تری می‌باشد. نکته‌ای که حائز اهمیت می‌باشد این است که مدت زمان بارگذاری در نمونه با حد وسط دانه‌بندی، بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد و دلیل آن را می‌توان در مقاومت اصطکاکی اولیه در نمونه با حد وسط دانست که به دلیل کم بودن مقاومت ثانویه، نیروی اصطکاکی نهایی کمتری را تحمل کرده است.



شکل ۴. تغییرات نیروی اصطکاکی بین دو لایه بیندر و توپکا در صورت وجود قیر بدون آلودگی بین دو لایه

۲-۶ قیر به همراه خرده لاستیک

همان‌گونه که از جدول ۵ مشخص می‌باشد، بیشترین میزان نیرو در نمونه با حد پایین و حد بالای سنگدانه بیندر و توپکا ایجاد شده است. میزان نیرو در این حالت از نیرو در حالت قیر بیشتر می‌باشد که می‌توان دلیل این امر را به خاطر ذوب شدن خرده لاستیک درون قیر و

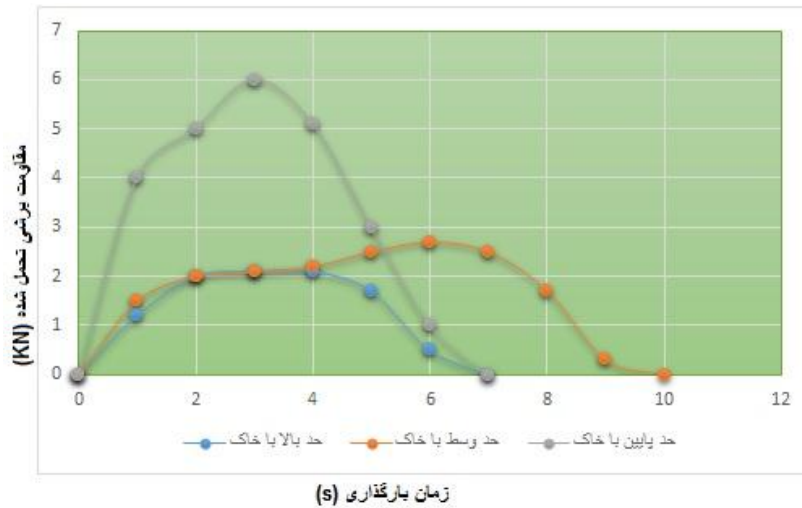
افزایش میزان چسبندگی در بین دو لایه بیندر و توپکا دانست.

۳-۶ قیر به همراه خاک

شکل ۵، میزان تغییرات نیروی اصطکاکی را برای نمونه‌ای که از قیر به همراه خاک برای چسبندگی بین

کاهش مقاومت چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا پی برد. بنابراین، تمیز بودن سطح بیندر از هر گونه گرد و غبار قبل از اجرای سطح توپکا بسیار مهم است.

دو لایه استفاده شده است، نشان می‌دهد. همان طور که از نمودار مشخص می‌باشد، بیشترین میزان نیرو در نمونه با حد پایین سنگدانه بیندر و توپکا ایجاد شده است. از این تغییرات می‌توان به اثر آلودگی خاک در



شکل ۵. تغییرات نیروی اصطکاکی بین دو لایه بیندر و توپکا در صورت وجود قیر بدون آلودگی بین دو لایه

است. اما برخلاف انتظار، استفاده از این ماده باعث کاهش مقاومت چسبندگی بین دو لایه شده است.

۴-۶. قیر و خرده چوب

جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین میزان نیرو در نمونه با حد بالای سنگدانه بیندر و توپکا ایجاد شده است. نکته‌ای که در این حالت مورد توجه می‌باشد، کاهش مقاومت و مدت زمان بارگذاری در نمونه با حد پایین سنگدانه نسبت به ۴ حالت قبلی می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان وجود حفرات زیاد در نمونه با حد پایین و پُر شدن این حفرات با خرده چوب‌هایی که فاقد مقاومت کافی می‌باشند دانست.

۶-۶. تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی

به علت محدودیت تعداد خروجی نتایج آزمایشگاهی، تعیین نرمال بودن نتایج حاصل از فرایند آزمایشگاهی یکی از موارد ضروری در تحقیقات است. لذا، آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^۱ برای این هدف مناسب است (بایزیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

۵-۶. قیر و الیاف

بیشترین میزان نیرو در نمونه مطابق جدول ۵ مربوط به حد پایین سنگدانه بیندر و توپکا است. امروزه ثابت شده که استفاده از الیاف در آسفالت باعث افزایش مقاومت کششی آن می‌شود و همین اصل، اساس استفاده از الیاف به‌منظور چسبندگی بین دو لایه بوده

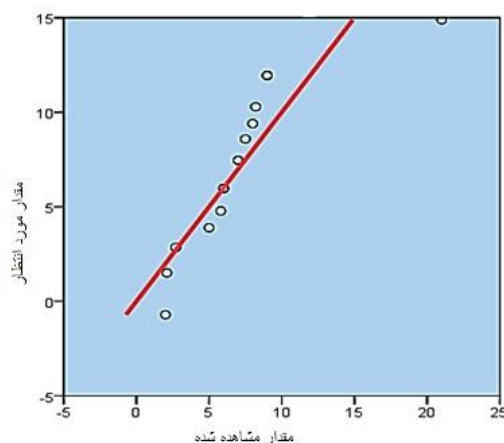
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶، دلیلی بر رد این ادعا که توزیع مورد نظر نرمال است وجود ندارد و آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برای تطابق توزیع نمونه با توزیع نظری غیرمعنی‌دار است ($P > 0/5$) و $(Z=1/039)$.

1- Kolmogorov-Smirnov

جدول ۶. نتیجه آزمون آماری برای بررسی اثر چسبندگی در نمونه‌های آزمایشگاهی

پارامتر	حداکثر مقدار
تعداد	۱۵
پارامترهای نرمال	۷/۰۸۶۷
انحراف استاندارد	۴/۴۸۴۲۴
مقدار مطلق	۰/۲۶۸
حداکثر تفاضل موجود	۰/۲۶۸
مقدار مثبت	۰/۱۲۸
مقدار منفی	۰/۱۲۸
مقدار Z آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	۱/۰۳۹
مقدار معنی‌داری (دو طرفه)	۰/۲۳۱

با استفاده از رسم نمودار بررسی نرمال بودن داده‌ها در شکل ۶ برای متغیر میانگین حداکثر مقاومت برشی، مشاهده می‌شود که داده‌ها تقریباً روی خط نرمال قرار گرفته‌اند.



شکل ۶. نمودار بررسی نرمال بودن داده‌ها برای متغیر میانگین حداکثر مقاومت برشی

۷. مشخصات مکانیکی و هندسی مدل

در روند بررسی اثر چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا، در کنار تحقیقات آزمایشگاهی، می‌توان به مدل‌سازی عددی نیز اتکا کرد. بر این اساس، از نرم‌افزار مدل‌سازی آباکوس استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی، داشتن خطای ۱۰ تا ۱۵ درصد قابل پیش‌بینی می‌باشد، زیرا بعضی از خطاها، از جمله عدم تطابق مدل رفتاری مصالح با واقعیت و مش‌بندی، قابل حذف کامل نمی‌باشند (کاظمی و رهبر، ۱۳۹۴).

۷-۱. مدل‌سازی

در طراحی مدل، از سه لایه بیندر، توپکا و لایه مصالح شنی که شامل اساس، زیراساس و خاک بستر می‌باشد، استفاده شده است. طول در نظر گرفته شده، با توجه به زمان عکس‌العمل ۲/۵ ثانیه در سرعت ۷ km/h، برابر ۴۰ متر است که شدیدترین نیروی برشی در این حالت وارد می‌شود. مشخصات لایه‌ها در جدول ۷ آمده است (کاظمی و رهبر، ۱۳۹۴).

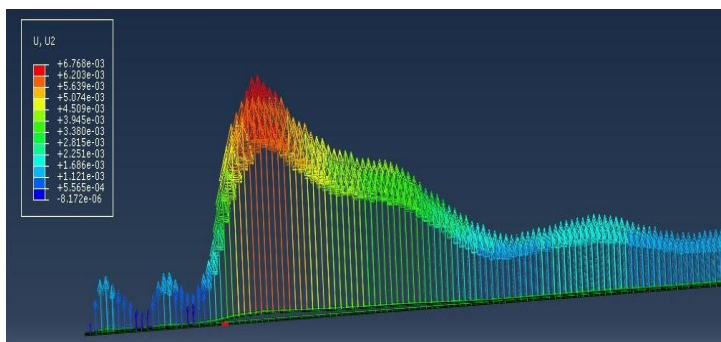
جدول ۷. مشخصات لایه‌های روسازی در مدل‌سازی عددی (کاظمی و رهبر، ۱۳۹۴)

ضخامت حالت اول (m)	ضخامت حالت دوم (m)	مدول الاستیسیته (kg/m^2)	وزن مخصوص (kg/m^3)	ضریب پواسون	لایه
۱	۱	۵۰	۱۸۰۰	۰/۳۰۶	مصالح شنی
۰/۱	۰/۱	۱۵۰	۲۱۰۰	۰/۲۴۲	ببندر
۰/۱	۰/۵	۱۰۰	۲۱۰۰	۰/۲۲۲	توپکا

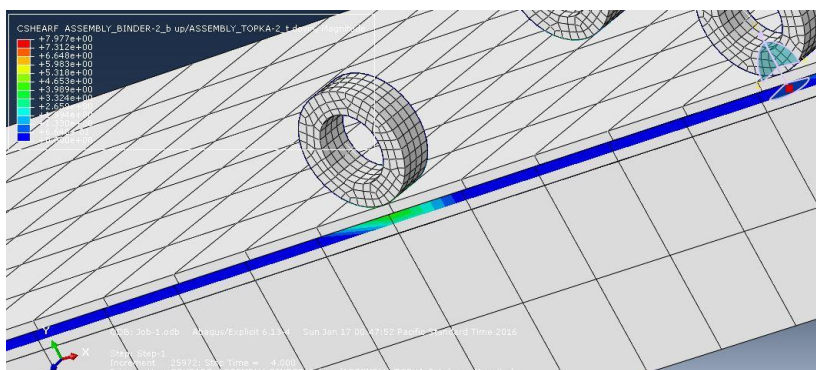
مرادی، ۱۳۹۴). در مدل‌سازی چرخ‌های وسیله نقلیه مدل‌سازی شده، از وسیله نقلیه پژو ۴۰۵ استفاده شده است. فاصله بین دو محور عقب و جلو ۲/۶۷ متر و همچنین فاصله عرضی چرخ‌ها از یکدیگر ۲/۷ متر قرار داده شده است. همچنین، وزن کامل وسیله نقلیه روی هر چهار چرخ تقسیم شده و به صورت فشار داخلی ناشی از باد لاستیک، به لاستیک وارد شده است (وب سایت گروه صنعتی ایران خودرو). سرعت وسیله نقلیه در دو حالت سرعت استاندارد که ۶۰ km/h برای باند کندرو و حداکثر ۸۰ km/h برای باند تندرو می‌باشد، بررسی شده است (نشریه شماره ۴۱۵، ۱۳۹۲).

در تعریف نحوه حرکت وسیله نقلیه به‌منظور شبیه‌سازی مطابق با واقعیت، ابتدا وسیله نقلیه با سرعت ثابت در مسیر حرکت می‌کند و در بازه زمانی ۱/۵ تا ۴ ثانیه، شتاب منفی به‌منظور کاهش سرعت وسیله نقلیه به آن اعمال می‌گردد. در بازه زمانی ۴ ثانیه، به دلیل حداکثر کاهش سرعت، نیروی اصطکاکی در آن زمان به‌عنوان نیروی اصطکاکی ماکزیمم در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، نحوه تغییرات تنش در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است که مطابق با واقعیت می‌باشد.

در لایه‌های روسازی جدول ۷، هر کدام از این لایه‌ها از طریق تعریف سیستم مختصاتی در نرم‌افزار مدل‌سازی به صورت سطح به سطح روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. به منظور ایجاد چسبندگی بین دو لایه، سطوح مرتبط با هم از طریق معرفی سطوح، به عنوان سطوح هم‌سطح و تعریف ضریب چسبندگی بین‌لایه‌ای، به هم متصل شده‌اند. در بحث رفتار لایه‌ها، لایه بستر در تمامی جهات (z,y,x) به جهت ثابت ماندن و بررسی لغزش دو سطح ببندر و توپکا روی همدیگر کاملاً گیردار شده‌اند. همچنین، لایه ببندر و توپکا به جهت جلوگیری از جابه‌جایی‌های جانبی در راستای z مهار شده است. برای طراحی مسیر، طول ۴۰ متر و عرض ۳/۶۵ متر به کار رفته است. در طراحی وسیله نقلیه عبوری، از وسیله نقلیه سواری با محور استاندارد جلو به وزن ۱ تن و محور عقب به وزن ۱ تن استفاده شده است. دلیل انتخاب این نوع وسیله نقلیه این می‌باشد که در مسیرهای بین‌شهری و درون‌شهری بیش از ۹۰ درصد تردد‌ها را وسایل نقلیه سواری نوع ۱ تشکیل داده است و بیشترین کاهش و افزایش سرعت در این حالت (در سبقت‌ها و ترمزها) به وقوع می‌پیوندد (خبیری و



شکل ۷. نحوه تغییرات تنش در اثر بارگذاری وسیله نقلیه



شکل ۸. تنش وارده بر سطح روسازی در ناحیه کاهش سرعت

اصطکاک را به نسبت مقاومت اصطکاکی که دارند، نسب به ضریب اصطکاک معادل به دست آمده، محاسبه کرد. از همین رو، بعد از معرفی سطوح مختلف در نرم-افزار مدل سازی، بین دو لایه بیندر و توپکا، ضریب اصطکاک معادل به نرم افزار معرفی شده و مدل اجرا شده است. به منظور بررسی حالات مختلف مقامت چسبندگی بین دو لایه در مدل سازی، برای لایه توپکا از دو ضخامت ۵ و ۱۰ سانتی متر استفاده شده است. ضرایب اصطکاک به دست آمده برای حالت های مختلف در مدل سازی با نرم افزار در جدول ۸ آمده است.

در جریان انجام آزمایش چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا، به دلیل شرایط آزمایش و نحوه قرارگیری نمونه، ضریب اصطکاک برای هر کدام از حالت ها از نتایج آزمایشگاهی قابل استخراج نمی باشد. به همین دلیل، به منظور پیدا کردن ضرایب اصطکاک آزمایشگاهی با استفاده از مدل سازی، سعی شده تا با قرار دادن ضرایب اصطکاک مختلف در نرم افزار و اجرا کردن آن در شرایط استاندارد (بارمحوری استاندارد و سرعت استاندارد ۶۰ km/h)، ضریب اصطکاک معادل یکی از حالت ها را به دست آورده و سپس سایر ضرایب

جدول ۸. ضریب اصطکاک بین دو لایه برای حالت های مختلف مدل سازی

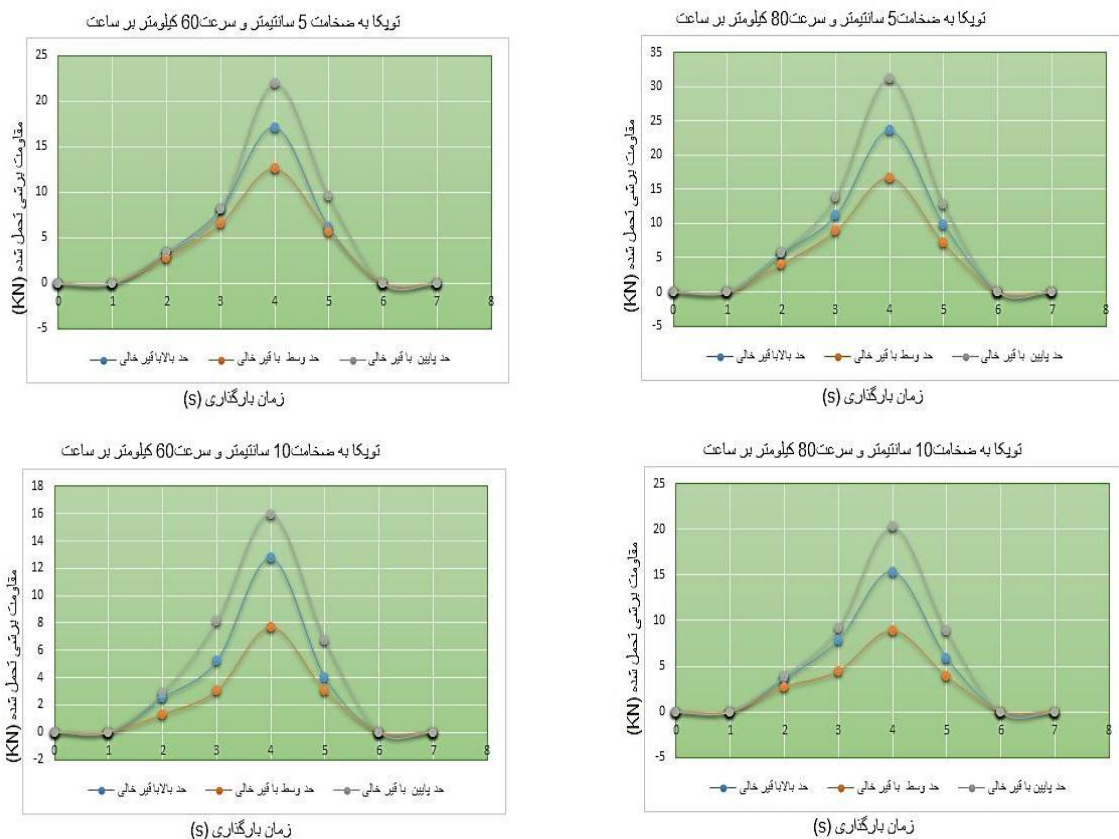
دانه بندی			نوع نمونه
حد پایین دانه بندی	حد وسط دانه بندی	حد بالای دانه بندی	
۰/۴۸	۰/۳۵۱	۰/۴۱	قیر بدون آلاینده
۰/۵۲۶	۰/۱۲	۰/۵۲۶	قیر به همراه خرده لاستیک
۰/۳۵۱	۰/۱۶	۰/۱۲۲	قیر به همراه خاک
۰/۴۶۸	۰/۳۵۱	۰/۳۴	قیر به همراه الیاف
۰/۲۹۲	۰/۴۱	۰/۴۳۹	قیر به همراه خرده چوب

۲-۷ ارائه و تحلیل نتایج مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا سه پارامتر به‌منظور تأثیر اثربخشی تغییر کرده است. این سه پارامتر عبارتند از: ضخامت لایه توپکا، سرعت وسیله نقلیه و ضریب چسبندگی بین دو لایه بیندر و توپکا. دلیل انتخاب سه عامل فوق این می‌باشد که افزایش ضخامت باعث کاهش تنش‌های منتقل شده به لایه‌های پایینی می‌شود. لذا، تأثیر ضخامت لایه توپکا بر چسبندگی بین دو لایه را می‌توان بررسی کرد. سرعت وسیله نقلیه در دو حالت سرعت زیاد و کم، روی تنش‌های وارده بر لایه‌های زیرین تأثیرگذار می‌باشد و

لذا این پارامتر روی چسبندگی بین دو لایه قابل بررسی می‌باشد. ضریب چسبندگی روی میزان چسبندگی بین دو لایه تأثیرگذار می‌باشد و لذا افزایش و کاهش میزان چسبندگی بین دو لایه می‌تواند بر تغییرات تنش اصطکاکی بین دو لایه تأثیرگذار باشد.

در راستای تغییر این عوامل، برای هر کدام از پنج حالت نمونه آزمایشگاهی، نتایج ارائه شده در شکل ۹ به دست آمد که در ادامه، خلاصه نتایج ناشی از تغییرات ایجاد شده در عوامل فوق در این مطالعات در جدول ۹ ارائه شده است.



شکل ۹. تغییرات نیروی اصطکاکی ایجاد شده در بین دو لایه در حالت چسبندگی با قیر (بدون آلودگی)

جدول ۹. تنش برشی ماکزیمم (KN) در محل کاهش سرعت در حالت‌های مختلف در اثر عبور وسیله نقلیه

نوع آلودگی	سرعت (km/h)	ضخامت (cm)	حد بالای دانه‌بندی	حد وسط دانه‌بندی	حد پایین دانه‌بندی
بدون آلودگی	۶۰	۵	۱۷/۱	۱۲/۵۵	۲۲
	۸۰	۵	۲۳/۶۵	۱۶/۷۲	۳۱/۲
	۶۰	۱۰	۱۲/۷۵	۷/۷	۱۵/۹۲
	۸۰	۱۰	۱۵/۳۵	۸/۹۲	۲۰/۳
خرده لاستیک	۶۰	۵	۲۷/۷	۶/۱	۲۷/۷
	۸۰	۵	۳۶/۱۵	۹/۳	۳۶/۱۵
	۶۰	۱۰	۱۸/۳۳	۱/۹	۱۸/۳۳
	۸۰	۱۰	۲۴/۵	۳/۱۵	۲۴/۵
خاک	۶۰	۵	۸/۰۲	۹/۶	۱۲/۵۵
	۸۰	۵	۱۱/۱	۱۴/۸	۱۶/۷۲
	۶۰	۱۰	۲/۰۲	۴/۸	۷/۷
	۸۰	۱۰	۳/۳۱	۶/۷۵	۸/۹۲
الیاف	۶۰	۵	۱۲/۳۱	۱۲/۵۵	۱۸/۶
	۸۰	۵	۱۵/۴۳	۱۶/۷۲	۲۴/۶۵
	۶۰	۱۰	۷	۷/۷	۱۴/۸۶
	۸۰	۱۰	۸/۱	۸/۹۲	۱۹/۵
خرده چوب	۶۰	۵	۱۷/۹	۱۷/۱	۱۰/۲۲
	۸۰	۵	۲۴/۳	۲۳/۶۵	۱۵/۳
	۶۰	۱۰	۱۴/۰۷	۱۲/۷۵	۵/۶
	۸۰	۱۰	۱۷/۸	۱۵/۳۵	۷/۶

افزایش نیروی اصطکاکی در محل کاهش سرعت شده است. همچنین، افزایش ضخامت موجب کاهش نیروی اصطکاکی وارد شده بین دو لایه در محل ترمز شده است. نرخ جابه‌جایی نهایی در اثر بارگذاری وسیله نقلیه در جدول ۱۰ آمده است.

همان‌طور که از نمودارهای شکل ۹ مشخص است، بیشترین مقاومت‌ها در حد پایین دانه‌بندی ایجاد شده است، بجز در حالتی که در بین دو لایه بیندر و توپکا از خرده چوب استفاده شده است. این اتفاق هم در سرعت‌های بالا و هم در سرعت‌های کم روی داده است. این نتایج در نمونه‌های آزمایشگاهی نیز به دست آمده بود. با توجه به نمودارها، افزایش سرعت باعث

جدول ۱۰. تغییر شکل نهایی (mm) در حالت‌های مختلف در اثر عبور وسیله نقلیه

نوع آلودگی	سرعت (km/h)	ضخامت (cm)	حد بالای دانه‌بندی	حد وسط دانه‌بندی	حد پایین دانه‌بندی
بدون آلودگی	۶۰	۵	۲/۷	۱/۳	۳/۹۵
	۸۰	۵	۴/۲۱	۶/۲	۳/۱
	۶۰	۱۰	۰/۰۰۰۹۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۶۷
	۸۰	۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۸
خرده لاستیک	۶۰	۵	۱/۲	۵/۱۲	۱/۲
	۸۰	۵	۲/۴	۱۴	۲/۶
	۶۰	۱۰	۰/۰۰۰۴۵	۱/۸	۰/۰۰۰۴۵
	۸۰	۱۰	۰/۰۰۰۵۲	۲	۰/۰۰۰۵۲
خاک	۶۰	۵	۵/۰۵	۴/۶۵	۳/۳
	۸۰	۵	۱۳	۱۰	۶/۲
	۶۰	۱۰	۱/۷۴	۱/۱	۰/۰۰۱۷
	۸۰	۱۰	۲	۱/۷	۰/۰۰۲
الیاف	۶۰	۵	۳/۴۷	۳/۳	۲/۱۸
	۸۰	۵	۶/۶۵	۶/۲	۳/۴۵
	۶۰	۱۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۷۲۵
	۸۰	۱۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۸۴
خرده چوب	۶۰	۵	۲/۴۱	۲/۷	۴/۱
	۸۰	۵	۳/۶	۴/۲۱	۷/۴
	۶۰	۱۰	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۷۳
	۸۰	۱۰	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱

موجب افزایش طول عمر روسازی و از سوی دیگر سبب کاهش در هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی و در نهایت ذخیره‌سازی منابع اقتصادی می‌شود. در این بین، اجرای صحیح دو لایه بیندر و توپکا به دلیل اینکه به صورت مستقیم در ارتباط با بارگذاری‌های وسایل نقلیه می‌باشد از اهمیت بالایی برخوردار است. این تحقیق، که به منظور بررسی اثر آلودگی‌های مختلف در بین دو لایه بیندر و توپکا انجام گرفته است، نتایج زیر را در پی داشته است:

با توجه به جدول ۱۰، افزایش سرعت، افزایش جابه‌جایی افقی نهایی را در پی دارد. از سوی دیگر، افزایش ضخامت در سرعت‌های اولیه موجب کاهش شدید تغییر شکل نهایی شده است. این نتایج، مطابق با تحقیق کانستراری و همکاران (۲۰۱۲) روی وابستگی تنش برشی و جابه‌جایی نهایی دو لایه بیندر و توپکا بر سرعت بارگذاری می‌باشد.

۸. نتیجه‌گیری

نحوه صحیح اجرای لایه‌های روسازی از یک سو

استفاده از الیاف بین دو لایه به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده مقاومت نه‌تنها باعث افزایش مقاومت نشده، بلکه به میزان ۲۰٪ از مقاومت بین‌لایه‌ای نسبت به حالت بدون آلودگی کاسته است.

۴- استفاده از خرده چوب که به‌عنوان آلاینده استفاده شده، باعث کاهش مقاومت اصطکاکی بین دو لایه در دو دانه‌بندی حد پایین و حد وسط شده، ولی باعث افزایش مقاومت اصطکاکی در حد بالای دانه‌بندی نسبت به حالت اندود سطحی فاقد آلودگی شده است. این در حالی است که در سایر نمونه‌ها، حد پایین دانه‌بندی بیشترین مقاومت را دارا می‌باشد.

۵- در مدل‌سازی عددی، افزایش ضخامت، کاهش نیروی اصطکاکی در محل کاهش سرعت تا ۵۰٪ و کاهش شدید در تغییرشکل نهایی سازه را در پی داشته است.

۶- در مدل‌سازی عددی، افزایش سرعت باعث افزایش نیروی اصطکاکی وارد بر محل کاهش سرعت تا ۴۰٪ و افزایش ۷۰ درصدی تغییرشکل نهایی در ضخامت ۵ سانتی‌متری توپکا و افزایش ۱۰ درصدی در ضخامت ۱۰ سانتی‌متری توپکا شده است.

۱- در نمونه‌ای که برای چسبندگی بین دو لایه از قیر بدون آلودگی استفاده شده است، بیشترین مدت زمان تحمل در برابر بارگذاری به میزان ۱۳ ثانیه اتفاق افتاده است که نسبت به سایر نمونه‌ها ۳۰٪ رشد در این مورد داشته است و دلیل آن را می‌توان مقاومت اصطکاکی اولیه بالا در مرز دو لایه دانست.

۲- بیشترین مقاومت اصطکاکی در بین تمام حالات در نمونه با افزودنی خرده لاستیک به وجود آمده است که رشد ۱۰ درصدی در میزان مقاومت نسبت به حالت اندود سطحی فاقد آلودگی دارد. این در حالی است که انتخاب خرده لاستیک در ابتدای تحقیق به‌عنوان یک آلاینده بوده است. ولی نتایج نشان می‌دهد که خرده لاستیک می‌تواند به‌عنوان یک افزایش‌دهنده مقاومت چسبندگی بین دو لایه به کار رود. همچنین، کمترین مقاومت در نمونه‌ای است که از خاک بین دو لایه به‌عنوان آلاینده در بین دو سطح استفاده شده است که با کاهش ۲۰ درصدی مقاومت نسبت به حالت اندود سطحی فاقد آلودگی شرایط نامناسبی را پدید خواهد آورد.

۳- برخلاف اینکه استفاده از الیاف باعث افزایش در مقاومت کششی در نمونه‌های آسفالتی می‌شود، ولی

۶. مراجع

- بایزیدی، ا.، اولادی، ب. و عباسی، ن. ۱۳۹۱. "تحلیل داده‌های پرسشنامه‌ای به کمک SPSS PASW 19". انتشارات عابد، تهران، ۳۰۶ صفحه.
- خیبری، م. م. و مرادی، م. ۱۳۹۴. "اثر سرعت وسایل نقلیه بر آلودگی هوای داخل تونل و عملکرد دید رانندگان". اولین همایش ملی توسعه پایدار در راهسازی با رویکرد حفظ محیط زیست، ۲۸ آبان، شیراز.
- کاظمی، م. و رهبر، ا. ۱۳۹۴. "بررسی تأثیر چسبندگی میان‌لایه‌های روسازی در خرابی روسازی با استفاده از مدل‌سازی عددی Abaqus". هفتمین کنفرانس آسفالت ایران.
- مرتضوی، ب. و طاهرخانی، ح. ۱۳۹۱. "مطالعه تأثیر دانه‌بندی مصالح سنگی بر روی خصوصیات مکانیکی بتن آسفالتی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی. ۱۳۹۱. "آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران". نشریه شماره ۴۱۵.
- معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی. ۱۳۹۲. "مشخصات فنی عمومی راه". نشریه شماره ۱۰۱.
- معمد زرگر، س. و فائزی، ف. ۱۳۹۳. "ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی معمولی". اولین همایش ملی عمران، معماری و توسعه پایدار، ۲۷ آذر، دانشگاه پیام نور یزد.
- وب سایت گروه صنعتی ایران خودرو. ۲۰۱۵. "مشخصات فنی پژو ۴۰۵".
<http://www.ikco.ir/fa/Product.aspx?ID=18&Section=2&Series>
- Canestrari, F., Ferrotti, G., Lu, X., Millien, A., Partl, M. N., Petit, C., Phelipot-Mardele, A., Piber, H. and Raab, C. 2012. "Mechanical Testing of Interlayer Bonding in Asphalt Pavements". In: *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, Springer, The Netherlands, pp. 303-360.
- Chun, S., Kim, K., Greene, J and Choubane, B. 2015. "Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests". *Constr. Build. Mater.*, 96: 307-318.
- Collop, A. C., Sutanto, M. H., Airey, G. D. and Elliott, R. C. 2009. "Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores". *Constr. Build. Mater.*, 23(6): 2251-2258.
- Correia, N. S. and Zornberg, J. G. 2014. "Influence of tack coat rate on the properties of paving geosynthetics". *Transport. Geotech.*, 1(1): 45-54.
- D'Andrea, A. and Tozzo, C. 2012. "Interlayer shear failure evolution with different test equipments". *Pocedia-Soc. Behav. Sci.*, 53: 556-567.
- De Souza Gaspa, M., Vasconcelos, K. L. and Bariani Bernucci, L. L. 2016. "Adhesion between Asphalt Layers through the Leutner Shear Test". 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, Springer, The Netherlands, pp. 495-500.
- Destrée, A., De Visscher, J., Piérard, N. and Vanelstraete, A. 2016. "Field study to investigate the impact of conditions of application of tack coats on the interlayer bond strength". 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, Springer, The Netherlands, pp. 347-358.
- Diakhaté, M., Millien, A., Petit, C., Phelipot-Mardelé, A. and Pouteau, B. 2011. "Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces". *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 1123-1133.
- Ferrotti, G., D'Andrea, A., Maliszewski, M., Partl, M. N., Raab, C., Sangiorgi, C. and Canestrari, F. 2016. "Inter-laboratory Shear Evaluation of Reinforced Bituminous Interfaces". 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, Springer, The Netherlands, pp. 309-321.
- Li, S., Huang, Y. and Liu, Z. 2016. "Experimental evaluation of asphalt material for interlayer in rigid-flexible composite pavement". *Constr. Build. Mater.*, 102(1): 699-705.
- Mehta, Y. 2007. "Evaluation of Interlayer Bonding in HMA Pavements". Wisconsin Department of Transportation, No. WHP 07-07.

- Raab, C., Abd El Halim, A. and Partl, M. N. 2012. "Interlayer bond testing using a model material". *Constr. Build. Mater.*, 26(1): 190-199.
- Raposeiras, A. C., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A. and Rodriguez-Hernandez, J. 2013. "Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers". *Constr. Build. Mater.*, 43: 372-381.
- Romanoschi, S. 1999. "Characterization of Pavement Layer Interfaces". Louisiana State University, Baton Rouge.
- Sun, X. 2011. "Modeling Analysis of Pavement Layer Interface Bonding Condition Effects on Cracking Performance". University of Florida.
- Tashman, L., Nam, K. and Papagiannakis, A. T. 2006. "Evaluation of the Influence of Tack Coat Construction Factors on the Bond Strength between Pavement Layers". Washington State Department of Transportation.
- West, R. C., Zhang, J. and Moore, J. 2005. "Evaluation of Bond Strength between Asphalt Pavement Layers". NCAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology. Auburn University, AL.
- Wheat, M. 2007. "Evaluation of Bond Strength at Asphalt Interfaces". PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Ziari, H. and Khabiri, M. M. 2007. "Interface condition influence on prediction of flexible pavement life". *J. Civil Eng. Manage.*, 13(1): 71-76.

