

بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی ساخته

شده با بتن غلتکی با استفاده از روش المان محدود

حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

الهه خیره، دانش آموزخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۰۱

چکیده

در این تحقیق تأثیر عوامل مختلف بر خرابی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین رویه آسفالتی در روسازی های ترکیبی با اساس بتن غلتکی مطالعه قرار گرفته است. این کار با تحلیل مدل‌های سه بعدی ساخته شده با روش المانهای محدود در نرم افزار ABAQUS انجام گرفته است. تأثیر نوع مخلوط آسفالتی در رویه، نوع و محل ژئوگرید و ضخامت رویه و اساس بتن غلتکی بر عملکرد روسازی بررسی گردیده است. نتایج نشان می دهند که نوع مخلوط آسفالتی بر مقدار شیار شدگی و کرنش های کششی حداکثر در سطح تأثیر زیادی دارد، به طوری که در شرایط مساوی تفاوت تا حدود ۲/۵ برابری در مقدار شیار شدگی و ۳/۵ برابری در مقدار کرنش کششی در سطح ملاحظه می گردد. همچنین، قرارگیری ژئوگرید در وسط رویه آسفالتی باعث کاهش شیار شدگی به مقدار ۳۲٪ نسبت به حالت غیر مسلح می گردد. مقدار تأثیر ژئوگرید به نوع مخلوط، سختی ژئوگرید و ضخامت رویه بستگی دارد. نسبت به حالت غیر مسلح، درصد کاهش شیار شدگی با استفاده از ژئوگرید در وسط لایه رویه از مخلوط ماستیک ۱ و ۲، به ترتیب، ۱۹ و ۲۱٪ میباشد. همچنین، نتایج نشان می دهند که قرار دادن ژئوگرید در وسط ضخامت رویه باعث کاهش عمر خستگی شده و قرار دادن آن در پایین رویه تأثیری در عمر خستگی نخواهد داشت. مقدار شیار شدگی و کرنش کششی در سطح رویه با افزایش ضخامت رویه افزایش یافته و با تغییر ضخامت لایه بتن غلتکی شیار شدگی تغییر نکرده ولی کرنش سطح کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: روسازی مرکب، بتن غلتکی، شیار شدگی، ترک بالا به پایین، ژئوگرید

۱. مقدمه

افزایش حجم و وزن محور ترافیک در راهها باعث شده که روسازی های انعطاف پذیر عملکرد مناسبی در بعضی از راهها نداشته باشند. بنابراین، گزینه های دیگر مورد توجه قرار گرفته اند، که یکی از آنها استفاده از روسازی های ترکیبی هستند که در آن از یک لایه صلب به عنوان اساس استفاده شده و یک لایه آسفالتی انعطاف پذیر بر روی آن اجرا می گردد. تجربه کشورهای مختلف نشان داده است که روسازی های ترکیبی، عملکرد بسیار خوبی را در راههای با ترافیک سنگین داشته اند [Nunez, 2007]. این نوع روسازی دارای عمر طولانی تر، صدای کمتر، همواری بیشتر، مقاومت لغزندگی بالاتر و ظرفیت باربری بیشتر بوده و به عملیات نگهداری کمتری نسبت به روسازی های انعطاف پذیر نیاز دارد [SHRP, 2013]. اجرای رویه آسفالتی بر روی اساس صلب باعث کاهش تنش های گرادیان دمایی و تنش های ناشی از بار ترافیک در لایه اساس صلب می گردد [Li, Liu and Liu, 2014]. در این نوع روسازی مقدار کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی به مقدار زیادی کاهش می یابد که باعث می شود عمر خستگی روسازی بالا باشد [Rith et al. 2017]. لایه صلب مورد استفاده در روسازیهای مرکب می تواند لایه بتن ساده و یا مسلح درز دار، بتن مسلح ممتد، بتن غلتکی، بتن کم سیمان، خاک تثبیت شده با سیمان و یا مصالح سنگی تثبیت شده با سیمان باشد. به دلیل مزایای فراوان، در چند دهه گذشته این نوع روسازی به شکلهای مختلفی در کشورهای مختلف ساخته شده اند. در اروپا اغلب روسازی های مرکب از ابتدا با همین ساختار ساخته می شوند که در آن رویه آسفالتی بر روی یک لایه اساس از خاک تثبیت شده با سیمان، یا مصالح سنگی تثبیت شده با سیمان، بتن غلتکی یا بتن کم سیمان ساخته می شود (شکل ۱). روسازی های مرکب در آمریکا بیشتر از بهسازی روسازی های صلب موجود با اجرای یک روکش آسفالتی بر روی رویه بتنی روسازی موجود، برای بهبود عملکرد سازه ای و وظیفه ای آن به وجود آمده اند [SHRP, 2013].

یکی از گزینه های مناسب برای لایه اساس روسازی های مرکب بتن غلتکی است. بتن غلتکی نوعی از بتن سیمانی است که از اختلاط مصالح سنگی درشت و ریز، سیمان و آب به مقدار کم ساخته شده و با اسلامپ نزدیک به صفر توسط فینیشر مخصوص آسفالت پخش شده و توسط غلتکهای ارتعاشی متراکم می شود [Hazree, Ceylan and Wang, 2012; Omran et al. 2017]. یکی از کاربردهای مهم بتن غلتکی در ساخت روسازی ها است. از مزایای بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی عدم نیاز به قالب، آرماتورهای تسلیح، میلگردهای اتصال و تای بار و درز است [Krishna Rao, Sravan and Chandrasekhar Rao, 2016]. این نوع روسازی می تواند در مدت کوتاهی اجرا شده و توسط ترافیک مورد بهره برداری قرار گیرد. از دیگر مزایای این نوع روسازی می توان به عدم نیاز به پرداخت سطح و دوام بالای آن اشاره نمود [Modarres and Hosseini, 2015]. این ویژگی ها باعث شده اند که روسازی بتن غلتکی در مقایسه با روسازی آسفالتی و بتن معمولی هزینه کمتری داشته باشد و گزینه مناسبی برای خیلی از کاربردها باشد. روسازی بتن غلتکی با محیط زیست سازگارتر بوده و در ساخت و بهره برداری از آن انرژی کمتری مصرف می گردد. یکی از مهمترین کاربردهای روسازی بتن غلتکی محللهایی است که دارای ترافیک سنگین و ایستا می باشند، مثل محل توقف هواپیماها و باندهای خزش در فرودگاهها، پارکینگ ماشین آلات سنگین، راههای دسترسی به مناطق صنعتی [Code 354, 2009]. یکی از مشکلات این روسازی ها این است که بعد از اجرا سطح نهایی همواری، زبری و مقاومت سایشی کافی را برای عبور ترافیک سریع نخواهد داشت. یکی از راهکارهای حل این مشکل اجرای یک لایه آسفالتی با ضخامت معین بر روی آن است. این لایه مشخصات مورد نیاز شامل همواری، زبری، راحتی و محافظت از لایه بتن غلتکی را ارائه خواهد داد [Code 354, 2009].



شکل ۱. ساختار روسازی ترکیبی با رویه آسفالتی

بالا گسترش می‌یابد [Taherkhani, Moradillo and Jalali, 2016]. اما، مطالعات نشان داده اند که ترک خوردگی بالا به پایین یکی نوع از خرابی های اصلی روسازی آسفالتی است [Hugo and Kennedy, 1985; Ulmeyer et al. 2000; Zhao, Alae and Fu, 2017]. آسفالتی روسازی های ترکیبی ترک خوردگی از نوع بالا به پایین می باشند، زیرا کرنش ها در پایین لایه آسفالتی معمولا از نوع فشاری است، مگر این که اتصال بین رویه آسفالتی و لایه صلب زیرین وجود نداشته باشد. ژائو و همکارانش با مقایسه ترک خوردگی خستگی دو نوع روسازی شامل روسازی با اساس تثبیت شده با سختی بالا و روسازی با اساس سنگدانه ای با سختی کم دریافتند که در روسازی با اساس سخت ترکهای بالا به پایین حاکم بوده و احتمال ترک خوردگی پایین به بالا وجود ندارد. اما، در روسازیهای با اساس سنگدانه ای، در دماهای متوسط و پایین ترک خوردگی پایین به بالا حاکم است و در دماهای بالا ترکهای بالا به پایین حاکم است [Zhao, Alae and Fu, 2017]. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش دما و ضخامت لایه آسفالتی احتمال ترک خوردگی بالا به پایین افزایش می یابد. در روسازی های انعطاف پذیر، شیار شدگی در مسیر چرخها در اثر تجمع تغییر شکلهای پلاستیگ در مصالح لایه های روسازی و بستر رخ می دهد. شیارهای بوجود آمده علاوه بر کاهش ایمنی و راحتی در رانندگی باعث پیشرفت سایر خرابی ها می گردد. شیارشدگی روسازی های ترکیبی اگرچه به اندازه روسازی های انعطاف پذیر نیست، اما، به دلیل قرار گرفتن لایه آسفالتی بر روی یک لایه با سختی بالا تحت تلاشهای زیادی قرار خواهد گرفت. تجمع تغییر شکلهای پلاستیگ در لایه آسفالتی و بستر و لایه های تثبیت نشده زیر لایه صلب باعث شیار شدگی می شود. به

روسازی های ترکیبی ممکن است در طول عمر بهره برداری از آنها به انواع خرابی ها دچار گردند که این خرابی ها خیلی شبیه به خرابی های روسازی های آسفالتی است. در بین خرابی های روسازی های ترکیبی سه نوع خرابی بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند که عبارتند از ترک خوردگی خستگی در لایه آسفالتی (به صورت پایین به بالا یا بالا به پایین) یا لایه صلب، شیارشدگی ناشی از تغییر شکل پلاستیگ در لایه آسفالتی و بستر و ترک خوردگی انعکاسی در رویه آسفالتی. ترک خوردگی انعکاسی رایجترین و بحرانی ترین نوع خرابی از نظر نیاز به بهسازی و تعمیر در این نوع روسازی هاست که به دلیل حرکات افقی و عمودی در محل ناپیوستگی (ترک یا درز) در لایه صلب باعث بروز ترک در لایه آسفالتی می شود [Ceylan et al. 2005; Yun et al. 2011; Baek, 2010]. عوامل اصلی در ترکهای انعکاسی در روکش آسفالتی بار ترافیک و تغییرات دمایی است [Von Quintus et al. 2007]. روشهای مختلفی برای کنترل یا کاهش این ترکها پیشنهاد شده است که از جمله آنها می توان به استفاده از ژئوگرید و ژئوتنکستایل، استفاده از لایه های جاذب ترک و برش و آب بندی روکش آسفالتی در محل درزها است [Nunez, 2007]. ژئوگرید رایج ترین نوع ژئوستنتیکهاست که برای تقویت روسازیها مورد استفاده قرار می گیرد [Khodakarami and Khakpour Moghadam, 2017]. خستگی در مخلوطهای آسفالتی در اثر تکرار تنش یا کرنش های کششی ایجاد شده توسط بارهای ترافیک رخ می دهد [Taherkhani and Khaleghi, 2017]. خستگی مخلوطهای آسفالتی منجر به ترک خوردگی خواهد شد. به طور سنتی، ترک خوردگی خستگی در روسازی های آسفالتی به صورت پایین به بالا مدل سازی می گردد، که در پایین لایه آسفالتی شروع و به

ضخامت مختلف برای لایه بتن غلظتی شامل ۲۰، ۲۲ و ۲۴ سانتیمتر استفاده گردیده است. بار مورد استفاده در این تحقیق، یک محور استاندارد با زوج چرخ و وزن ۸/۲ تن است که فشار باد آن ۵۵۲kPa بوده و سطح تماس چرخ با سطح رویه مستطیل در نظر گرفته شده است. مدلسازی و تحلیل روسازی ها با روش المانهای محدود انجام گرفته و عمق شیار شدگی روکش آسفالتی و کرنش کششی حداکثر در سطح رویه محاسبه گردیده است.

۳. روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از مدلسازی سه بعدی در نرم افزار المان محدود آباکوس، مقاطع روسازی بتن غلظتی با روکش آسفالتی شبیه سازی شده و پاسخ های روسازی تحت شرایط مختلف مذکور در بخش پیشین به دست آمده و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته اند. همان گونه که در قسمت قبل بیان گردید، ۵ نوع مخلوط آسفالتی با ویژگیهای مختلف در این تحقیق به عنوان روکش آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته اند. این مخلوطها دارای کیفیتهای متفاوت بوده و کاربرد آنها در روسازی راههای با ترافیک کم تا خیلی سنگین است [Uzarowski, 2006]. تفاوت این مخلوطها در دانه بندی ها، کیفیت قیر و مصالح سنگی و رفتار آنهاست. این مخلوطها از پروژه های مختلف در ایالت انتاریوی کانادا نمونه گیری شده و مورد آزمایش قرار گرفته اند [Uzarowski, 2006]. جزئیات بیشتر در مورد ویژگی های این مخلوط در جای دیگری قابل دسترسی است [Uzarowski, 2006]. برخی از مشخصات این مخلوطها در جدول ۱ نشان داده شده اند. مخلوط بتن آسفالتی معمولی کاربردش در روسازی راههای با ترافیک کم تا متوسط در انتاریوی کاناداست، در حالی که مخلوط ماستیک نوع ۱ و ۲ و سوپریو نوع ۲ در راههای با ترافیک خیلی سنگین (بیش از ۳۰ میلیون محور استاندارد) به کار می روند. مخلوط سوپریو نوع ۱ در راههای با ترافیک سنگین (بین ۱۰ تا ۳۰ میلیون محور استاندارد) به کار می رود [Uzarowski, 2006]. مخلوط آسفالتی ماستیک مخلوطی است از مصالح سنگی با دانه بندی منقطع و قیر خالص که در دمای بالا با یکدیگر مخلوط و متراکم می شوند. تفاوت ماستیک نوع ۱ و ۲ در این است که، با وجود یکسان بودن نوع قیر، در ماستیک نوع ۲ آزمایشات رئومتر برش دینامیکی نشان داد که قیر مورد استفاده الزامات مشخصات فنی

دلیل سختی بالای لایه بتنی در روسازی ترکیبی، مقدار تنش و کرنش ایجاد شده در بستر و لایه تثبیت نشده این نوع روسازی ها بسیار کم بوده و در شیار شدگی این نوع روسازی ها تاثیر ندارند، مگر این که لایه صلب آسیب دیده بوده و نتواند به درستی بار را توزیع نماید [SHRP, 2013]. بنابراین، کنترل شیار شدگی در این نوع روسازی ها به مقدار زیادی به کیفیت مصالح آسفالتی روکش و سطح تنش ایجاد شده در آنها بستگی دارد. همان گونه که در قسمتهای قبلی این بخش بیان گردید، خرابی های عمده در روکش آسفالتی روسازی های ترکیبی شامل ترکهای انعکاسی، خستگی بالا به پایین و شیار شدگی است. بررسی این خرابی ها از جنبه های مختلف نیاز به مطالعه دارد که به اندازه کافی بررسی نگردیده اند. هدف این تحقیق، بررسی اثرات عوامل مختلف بر روی دو نوع خرابی شیار شدگی و ترک خستگی بالا به پایین در رویه آسفالتی است. یکی از مواردی که نیاز به بررسی دارد، تاثیر ژئوگریدی که به عنوان کنترل کننده ترکهای انعکاسی استفاده می گردد، بر شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین است. تاثیر محل و نوع ژئوگرید بر این خرابی ها مورد بررسی قرار می گیرد.

۲. برنامه تحقیق

هدف این تحقیق بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی خرابی شیارشدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی بتن غلظتی با روکش آسفالتی است. به همین منظور، اثر نوع مخلوط، نوع و موقعیت ژئوگرید، ضخامت روکش آسفالتی و بتن غلظتی بر روی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روکش آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر ۵ نوع مخلوط آسفالتی با ویژگی های مختلف شامل یک نوع بتن آسفالتی معمولی، دو نوع آسفالت ماستیک درشت دانه و دو نوع بتن آسفالتی سوپریو بر روی دو خرابی مختلف در این تحقیق بررسی گردیده است. دلیل استفاده از این مخلوطها، متفاوت بودن نوع دانه بندی، نوع قیر و روش طرح اختلاط در آنهاست، که اثر این ویژگیها بر روی خرابی های مورد بررسی مطالعه خواهد شد. همچنین، تاثیر سه نوع ژئوگرید با خصوصیات مکانیکی مختلف با قرار گیری در دو عمق مختلف شامل وسط ضخامت روکش آسفالتی و پایین روکش آسفالتی بر روی دو خرابی مذکور مورد بررسی قرار گرفته اند. سه ضخامت مختلف برای روکش آسفالتی، شامل ۴، ۵ و ۶ سانتیمتر، و سه

بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی.....

که در آن σ تنش و t زمان و A ، m و n ثابتهای مصالح می باشند. ثابت های این مدل رفتاری شامل A ، m و n از نتایج تحقیقات قبلی به دست آمده اند [Uzarowski, 2006]. این پارامترها با استفاده از نتایج آزمایش خزش و باربرداری به دست آمده و بر اساس نتایج آزمایش رد چرخ اصلاح گردیده اند. جدول ۲ مقادیر این پارامترها را برای ۵ نوع مخلوط مورد استفاده در این تحقیق نشان می دهد. رفتار لایه بتن غلتکی، زیر اساس سنگدانه ای و بستر روسازی الاستیک خطی در نظر گرفته شده و مدول الاستیک و نسبت پواسون آنها از نتایج تحقیقات قبلی استفاده گردیده اند [Famili and Vafaei, 2016]. جدول ۳ مشخصات این مصالح را نشان می دهد. جدول ۴ مشخصات مکانیکی ژئوگریدهای استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد.

را از نظر مقاومت به شیار شدگی تامین نکرده و نرمتر از قیر مورد استفاده از مخلوط ماستیک نوع ۱ است. مخلوط سوپر پیو یک نوع بتن آسفالتی است که طرح اختلاط و دانه بندی آن بر اساس روش طرح اختلاط سوپر پیو است. تفاوت سوپر پیو نوع ۱ و ۲ نیز علاوه بر نوع قیر این است که نوع ۱ دارای دانه بندی و بافت ریزتری از نوع ۲ است.

رفتار مصالح آسفالتی به صورت الاستو-ویسکو-پلاستیک در نظر گرفته شده و مدل رفتاری مورد استفاده برای آنها مدل توانی خزش میباشد. در این مدل رفتاری مقدار کرنش ویسکوپلاستیک ϵ_{vp} که مولفه اصلی تغییر شکل دائمی در مخلوط است با استفاده از رابطه ۱ بیان می شود [Huang, 1995; Hua, 2001].

$$\epsilon_{vp} = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

جدول ۱. برخی از مشخصات مخلوطهای به کار رفته در این تحقیق [Uzarowski, 2006]

مشخصه		نوع مخلوط				
VFA ²	VMA ¹	درصد فضای خالی مخلوط	نوع دانه بندی	درصد قیر	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	نوع قیر
۷۴/۲	۱۵/۵	۴	پیوسته	۵/۳	۱۶	PG58-28
۷۸	۱۸/۲	۴	منقطع	۵/۷	۱۲/۵	PG70-28PM
۷۷/۱	۱۷/۵	۴	منقطع	۵/۷	۱۲/۵	PG70-28PM
۶۹/۹	۱۳/۳	۴	پیوسته	۴/۳۵	۱۹	PG64-28
۶۹/۴	۱۳	۴	پیوسته	۴/۶	۱۹	PG70-28

^۱ درصد فضای خالی مصالح سنگی

^۲ درصد فضای خالی پر شده با قیر

جدول ۲. مشخصات مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده [Uzarowski, 2006]

ویژگی های مصالح					نوع مخلوط
خزش		الاستیک			
n	m	A	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	
-۰/۱۶	۱/۴۸	۱۴	۰/۴۱	۹۵۰	بتن آسفالتی معمولی
-۰/۱۶۶	۱/۰۴	۱۱۳	۰/۴۱	۸۰۰	آسفالت ماستیک نوع ۱
-۰/۱۶۵	۱/۳۱	۴۲	۰/۴۲	۸۰۰	آسفالت ماستیک نوع ۲
-۰/۱۶۸	۱/۲۰	۳۲	۰/۳۹	۱۶۰۰	مخلوط سوپر پیو نوع ۱
-۰/۱۶۴	۱/۲۰	۴۷	۰/۴۰	۱۴۰۰	مخلوط سوپر پیو نوع ۲

جدول ۳. مشخصات لایه های زیرین روسازی [Famili and Vafaei, 2016]

نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	لایه های روسازی
۰/۲۲	۳۱۰۰۰	بتن غلتکی
۰/۳۵	۱۵۵	اساس سنگدانه ای
۰/۴۵	۵۰	بستر

جدول ۴. مشخصات ژئوگریدها [Taherkhani, Moradloo and Jalali, 2016]

نوع ژئوگرید	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	مقدار باز شدگی ظاهری (AOS) (mm)	مقاومت کششی در ۵٪ کرنش (N/m)	ضخامت تار و پود (mm)
نوع ۱	۷۶۰۰۰	۰/۲۲	۱۰	۱۳۵۰	۱/۷
نوع ۲	۵۵۱۶	۰/۳	۱۰	۴۰۰	۱/۷
نوع ۳	۴۲۶	۰/۲۵	۱۰	۱۵۰	۱/۷

آزمایشگاهی نشان داده است که حداقل ضخامت یک لایه آسفالتی بین ۳ تا ۴ برابر حداکثر اندازه سنگدانه باشد [Brown et al. 2005]. همچنین، لایه با ضخامت کمتر از ۳۸ میلیمتر به سرعت سرد شده و فرصت تراکم را نخواهد داد [Brown et al. 2005]. با توجه به این نکات، و حداکثر اندازه سنگدانه های مخلوطهای مورد استفاده در این تحقیق، حداقل ضخامت لایه رویه در سه اندازه مشخص شده در جدول ۵ استفاده گردیده است. در مدلسازی، برای همگرایی و دقت بیشتر نتایج از المانهای مکعبی هشت گره ای (3D8R) استفاده شده است [Rahman, Mahmoud and Ahsan, 2011].

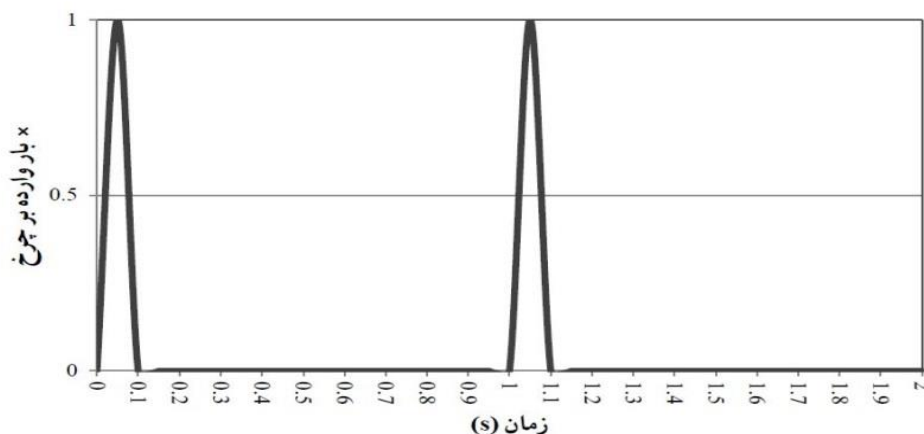
مدلسازی روسازیهها در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ABAQUS/CAE 6.13 انجام گرفته است. بر اساس تحقیقات قبلی [Ghilcrist et al. 2001]، ابعاد مدل در این تحقیق در جهت X و Y ۹۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. برای بر طرف نمودن ناهمواری سطح روسازی بتن غلتکی، یکی از راهکارهای معمول استفاده از یک روکش آسفالتی است. با توجه به تاثیر کم این لایه بر عملکرد سازه ای، به منظور اقتصادی بودن، ضخامت آن در حداقل نگه داشته می شود. این ضخامت معمولاً ۵ سانتیمتر استفاده می شود [Koozhmishi, 2013]. البته، برای تراکم بهینه، تحقیقات میدانی و ارزیابی

جدول ۵. ضخامت لایه های روسازی

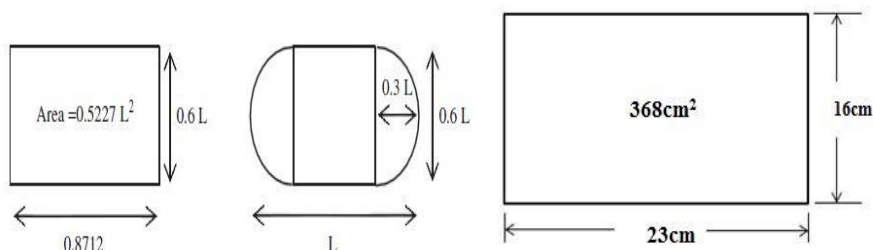
نوع لایه	روکش آسفالتی	لایه بتن غلتکی	اساس سنگدانه ای	بستر
ضخامت (cm)	۶ و ۵، ۴	۲۴ و ۲۲، ۲۰	۳۰	۱۳۰

بارگذاری مدل‌های ساخته شده با محور ۸۲kN با چرخهای زوج انجام گرفته است که سهم هر چرخ ۲۰/۰۵ کیلونیوتن است. شکل سطح تماس چرخ با روسازی به صورت مستطیلی در نظر گرفته شده است، که با در نظر گرفتن فشار باد چرخ ۵۵۲kPa ابعاد سطح بارگذاری محاسبه گردیده است (شکل ۲).

برای تحلیل مدل‌های ساخته شده در نرم افزار از تحلیل دینامیکی استفاده گردیده است. بار به صورت مثلثی در نظر گرفته شده است. زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه در نظر گرفته شده است (شکل ۱). بارها با گام ۰/۰۵ ثانیه اعمال گردیدند. تعداد سیکل‌های بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق ۱۰۰ سیکل بارگذاری است که زمان کل آن ۱۰۰ ثانیه است.



شکل ۱. بارگذاری مدل روسازی با استفاده از محور استاندارد



شکل ۲. شکل سطح تماس بارگذاری [Huang, 2004]

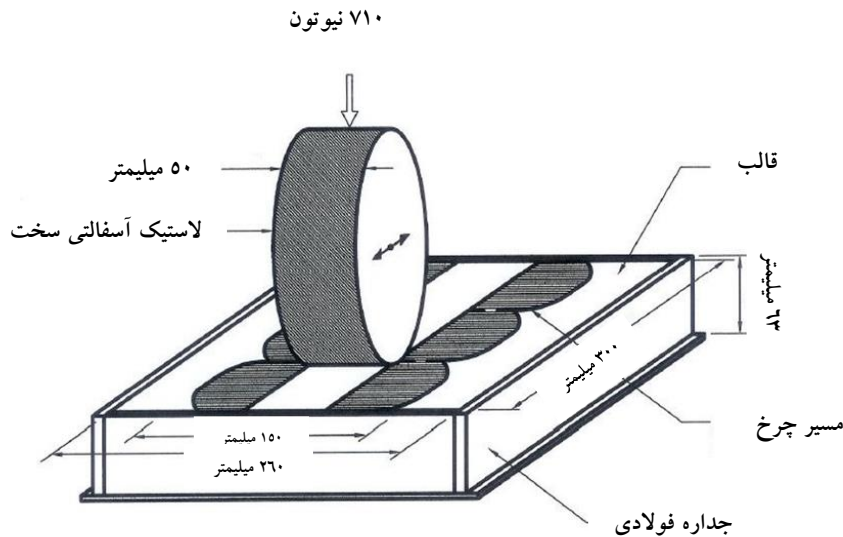
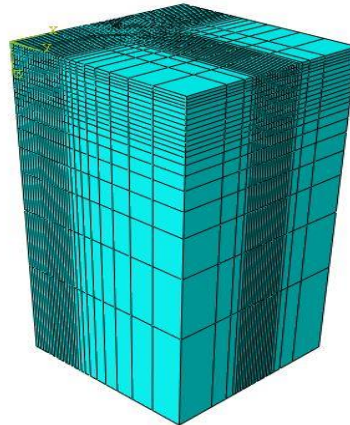
یک المان صفحه ای با سختی معین استفاده گردید که هیچ گونه لغزشی در لایه آسفالتی ندارد.

به منظور افزایش دقت در تحلیل و کارآمدی تحلیل از نظر زمان تحلیل از حالت مش بندی بهینه که در آن مش ها در نزدیکی بار فشرده تر می باشند و در نواحی دور تر از بار درشت تر می باشند استفاده گردیده است. ابعاد مش ها در محل سطح تماس چرخ و روسازی ۱ تا ۱/۵ سانتیمتر لحاظ گردیده است. شکل ۳ مش بندی مدل را نشان می دهد.

مقدار عمق شیار شدگی اندازه گیری شده ۱/۵۲ میلیمتر و مقدار عمق شیار شدگی به دست آمده از مدلسازی اندازه گیری شده ۱/۲۶ میلیمتر است که تفاوت حدود ۱۰٪ آنها قابل قبول تلقی می گردد.

در مدل‌های ساخته شده در این تحقیق برای ارزیابی شیار شدگی از حرکت لایه ها در جهت X و Y جلوگیری گردیده و حرکت در جهت قائم آزاد است. همچنین، در ارزیابی کرنش کششی در سطح روکش حرکت در جهات X و Z آزاد است. به استثنای مدل‌های ساخته شده برای روسازی مسلح شده با ژئوگرید، چسبندگی بین لایه ها کامل فرض شده است. اما، در مدل‌هایی که در آنها از ژئوگرید استفاده گردیده است ژئوگرید به صورت مدفون در روکش فرض شده است. برای تعریف ژئوگرید از برای اعتبار سنجی مدلسازی از نتایج آزمایش رد چرخ که با استفاده از مخلوط بتن آسفالتی معمولی بر اساس استاندارد [CEN 2004] prEN 12697-22 توسط یوزاروسکی در کانادا انجام گردیده استفاده شده است [Uzarowski, 2006]. شکل ۴ شماتیک آزمایش و ابعاد آن را نشان می دهد. مقدار عمق شیار شدگی بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری با تحلیل به دست آمده و با مقدار اندازه گیری شده مقایسه گردیده است.

شکل ۳. مش بندی مدل



شکل ۴. شماتیک ویلتراک مورد استفاده برای اعتبار سنجی [Uzarowski, 2006]

لایه بتن غلتکی ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد، مقادیر به دست آمده بسیار جزیی می باشند، که دلیل آن علاوه بر ضخامت کم رویه و عدم وجود تغییر شکل لایه های زیرین، تعداد تکرار کم بارگذاری مدلسازی شده در این تحقیق است. افزایش تعداد سیکل های بارگذاری باعث افزایش قابل توجه زمان تحلیلها می گردید. همچنین، مشاهده می گردد که، برای انواع مخلوطها عمق شیار شدگی متفاوتی به دست آمده است. به طوری که، بیشترین عمق شیار شدگی مربوط به روکش آسفالتی با مخلوط ماستیک نوع ۲ بوده و بعد از آن، به ترتیب، بتن آسفالتی معمولی، ماستیک نوع ۱، سوپرپیو نوع ۲ و سوپرپیو نوع ۱ قرار می گیرند. همان گونه که قبلا ذکر گردید، تفاوت در عمق شیار شدگی این مخلوطها به رفتار متفاوت قیرها در مخلوطها و دانه بندی

۳. نتایج و بحث

بعد از تحلیل مدلها با استفاده از نرم افزار مقادیر تغییر شکل عمودی حداکثر در سطح به عنوان حداکثر عمق شیارشدگی و کرنش کششی حداکثر در سطح برداشت شده و تغییرات آنها با شرایط مختلف ترسیم گردیدند. در بخشهای زیر اثر عوامل مختلف بر روی این دو ویژگی عملکردی مورد بررسی قرار می گیرد.

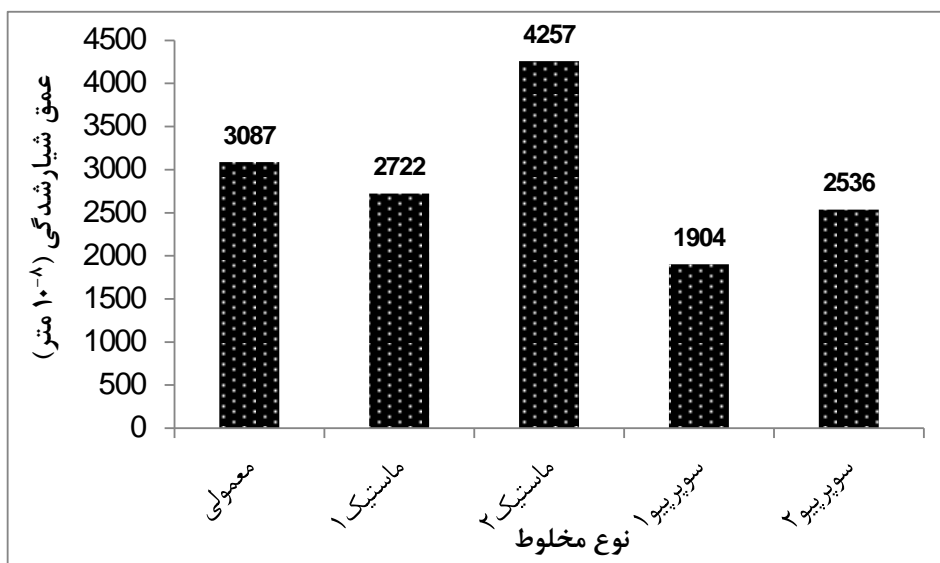
۳-۱ تاثیر نوع مخلوط

شکل ۵ میزان عمق شیار شدگی روکش آسفالتی را بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری برای انواع مختلف مخلوطها نشان می دهد. در بررسی انواع مخلوطها ضخامت روکش ۵ سانتیمتر و ضخامت

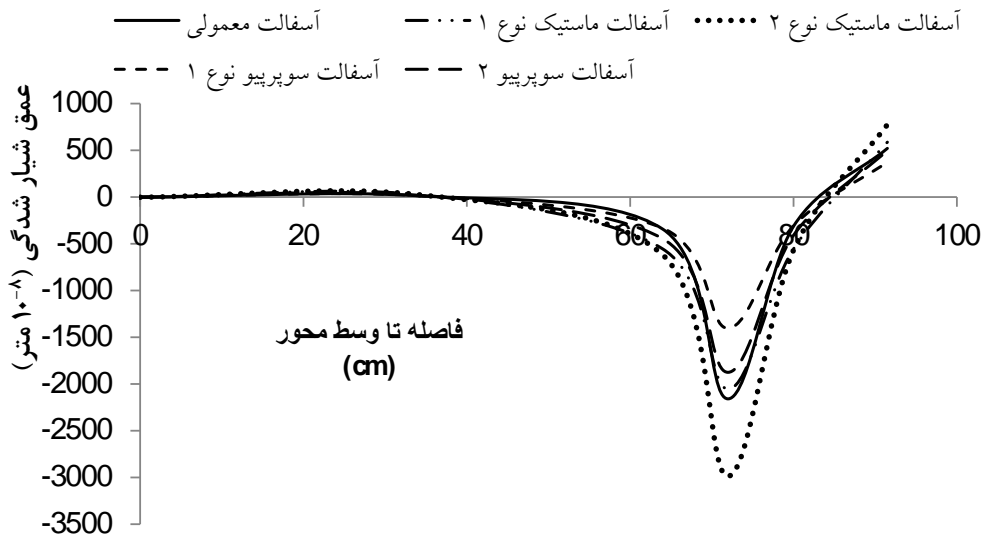
بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی.....

نشان داده می شود که سوپریو نوع ۱ کمترین شیار شدگی را خواهد داشت. با وجود نرمتر بودن قیر این مخلوط نسبت به سوپر پیو نوع ۲، علت کمتر بودن تغییر شکل دلثمی در این مخلوط به مقدار قیر آن (۴/۳۵٪ نسبت به ۴/۶٪) و دانه بندی ریز تر آن ارتباط می یابد. نتایج آزمایش نیز نشان دادند که مقدار تغییر شکل رخ داده در مخلوطهای ماستیک در تکرارهای اولیه (در ناحیه اول خزش) بیشتر از مخلوطهای با دانه بندی پیوسته است. با استفاده از نتایج تحلیل، مقدار تغییر شکل عمودی سطح روکش در امتداد عمود بر جهت حرکت تعیین گردیده و پروفیل تغییر شکل ترسیم گردید (شکل ۶). همان گونه که ملاحظه می گردد، بیشترین جابجایی مربوط به مخلوط ماستیک نوع ۲ بوده و کمترین مربوط به مخلوط سوپر پیو نوع ۱ است.

متفاوت سنگدانه ها در آنها ارتباط می یابد. با استفاده از این مخلوطها در آزمایش رد چرخ، یوزاروسکی [Uzarowski, 2006] عمق شیار شدگی را در تعداد تکرار بارهای مختلف اندازه گیری کرد و ملاحظه نمود که ترتیب مقدار عمق شیار شدگی در مخلوطهای مختلف با تعداد تکرار بارگذاری تغییر می نماید. مثلاً در تعداد تکرار ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری بیشترین عمق شیار شدگی مربوط به بتن آسفالتی معمولی بوده و بعد از آن آسفالت ماستیک نوع ۲، سوپریو نوع ۲، ماستیک نوع ۱ و سوپریو نوع ۱ قرار می گیرند، که با نتایج مدلسازی هماهنگی کامل ندارد. تفاوت ترتیب قرار گیری مخلوطها از نظر مقدار شیار شدگی از نتایج مدلسازی و آزمایش رد چرخ به تفاوت در شرایط بارگذاری در آزمایش و مدل و خطاها در تعیین ثابتهای مدل توانی خزش ارتباط می یابد. با این حال، در هر دو تحقیق



شکل ۵. حداکثر عمق شیار شدگی مخلوطهای مختلف



شکل ۶. پروفیل تغییر شکل سطح در مخلوطهای مختلف

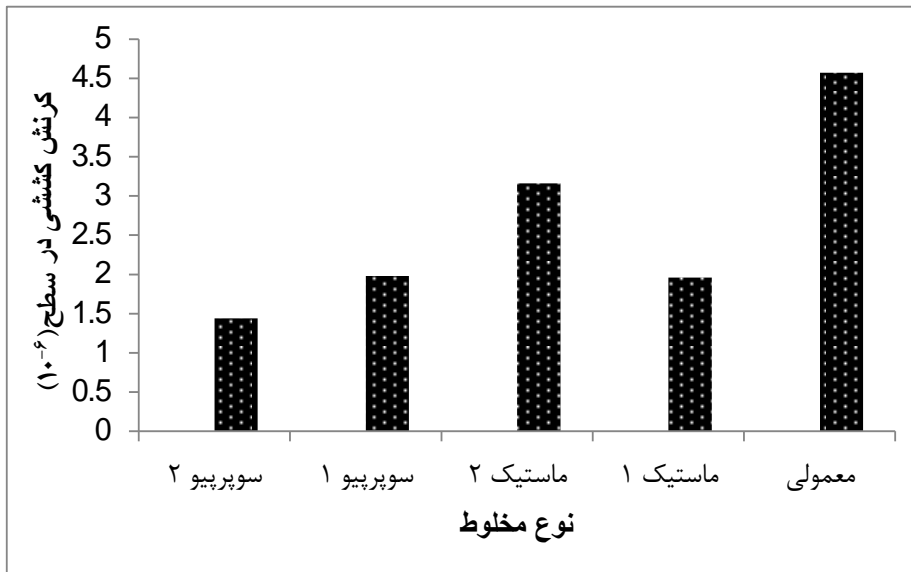
که در وسط روکش قرار میگیرد بیشتر میباشد، و قرار دادن ژئوگرید در پایین روکش آسفالتی تاثیری بر کاهش شیار شدگی نداشته است. به طوری که، با قرار دادن ژئوگرید نوع ۳ در وسط روکش آسفالتی مقدار شیار شدگی نسبت به حالت بدون ژئوگرید تا ۳۲٪ کاهش می یابد. همچنین، نتایج نشان می دهند که تاثیر ژئوگرید بر کاهش شیار شدگی با افزایش سختی ژئوگرید افزایش می یابد. به طوری که، ژئوگرید نوع ۱، ۲ و ۳، به ترتیب، ۳۲، ۲۲ و ۶٪ عمق شیار شدگی را کاهش داده اند. پروفیل تغییر شکل سطح روکش نیز که با انواع مختلف ژئوگرید مسلح گردیده در شکل ۹ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد، مسلح کردن روکش با قرار دادن ژئوگرید نوع ۱ در وسط ضخامت روکش باعث شده که جابجایی کمتری در روکش اتفاق بیافتد. در شکل ۱۰ نیز پروفیل تغییر شکل سطح در سه حالت برای مخلوط بتن آسفالتی معمولی نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد استفاده از ژئوگرید در زیر روکش آسفالتی تاثیری بر تغییر شکل روکش نداشته است، اما، قرار دادن آن در وسط لایه باعث کاهش قابل توجه در تغییر شکل گردیده است. این نتیجه گیری باید کننده نتایج تحقیقات خبیری [Khabiri, 2011] است که نشان داد میزان شیار شدگی روسازی با کاهش فاصله ژئوسنتتیک از سطح روسازی کاهش می یابد.

شکل ۷ نشان دهنده کرنش کششی حداکثر در سطح روکش آسفالتی برای انواع مختلف مخلوطها است که به عمر خستگی ترک خوردگی بالا به پایین ارتباط می یابد. همان گونه که ملاحظه می گردد کمترین مقدار کرنش، به ترتیب، مربوط به مخلوط سوپرپیو نوع ۲، ماستیک نوع ۱، سوپرپیو نوع ۱، ماستیک نوع ۲ و بتن آسفالتی معمولی است. با این حال، کمتر بودن مقدار کرنش نشان دهنده زیاد تر بودن مقاومت به ترک خوردگی نیست. برای تعیین عمر خستگی باید از مدلهای عمر خستگی توسعه داده شده برای هر کدام از مخلوطها استفاده نمود. به همین دلیل ممکن است که مخلوط با کرنش کششی بیشتر دارای عمر خستگی طولانی تری باشد.

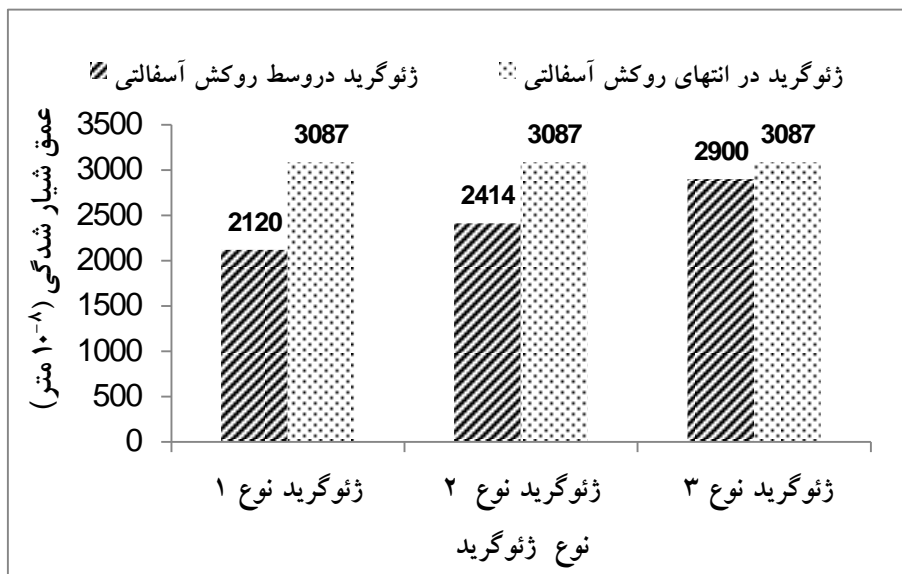
۳-۲ تاثیر مشخصات ژئوگرید بر عملکرد روکشها

به منظور بررسی تاثیر انواع مختلف ژئوگرید بر روی عملکرد روکشهای آسفالتی، سه نوع ژئوگرید با خصوصیات مکانیکی مختلف، هر کدام یکبار در وسط ضخامت روکش آسفالتی از نوع بتن آسفالتی معمولی به ضخامت ۵ سانتیمتر نصب شده و بار دیگر در قسمت پایین روکش قرار گرفته و تحلیل انجام گرفته است. شکل ۸ مقدار شیار شدگی را بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری در حالات مختلف نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه میگردد تاثیر ژئوگرید بر کاهش شیار شدگی در حالتی

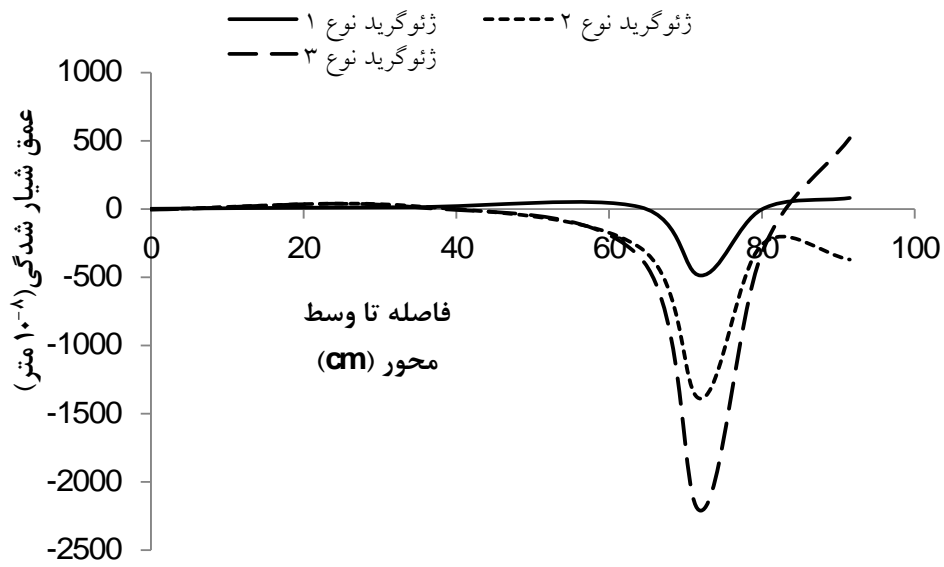
بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی.....



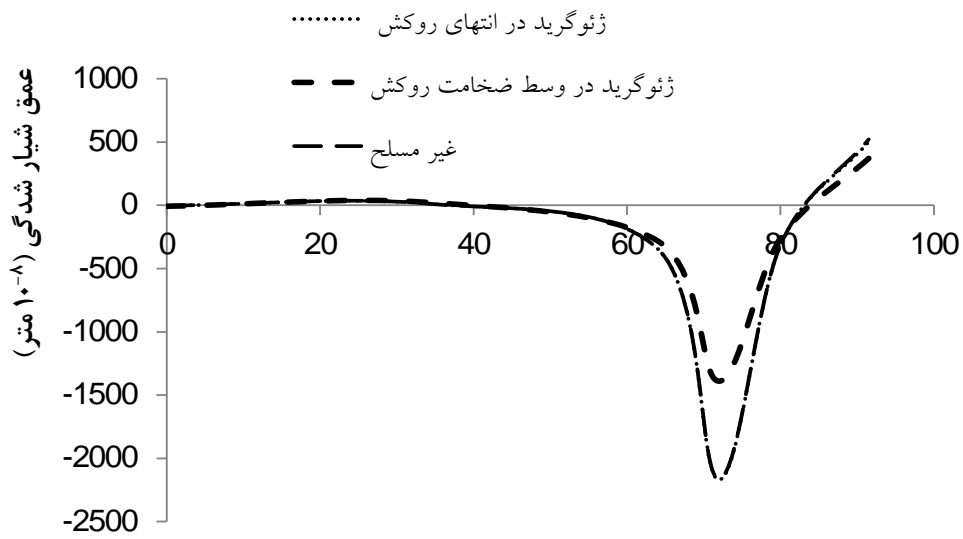
شکل ۷. حداکثر گرنش کشتی در سطح برای مخلوطهای مختلف



شکل ۸. تاثیر نوع و موقعیت ژنوگرید بر حداکثر عمق شیار شدگی

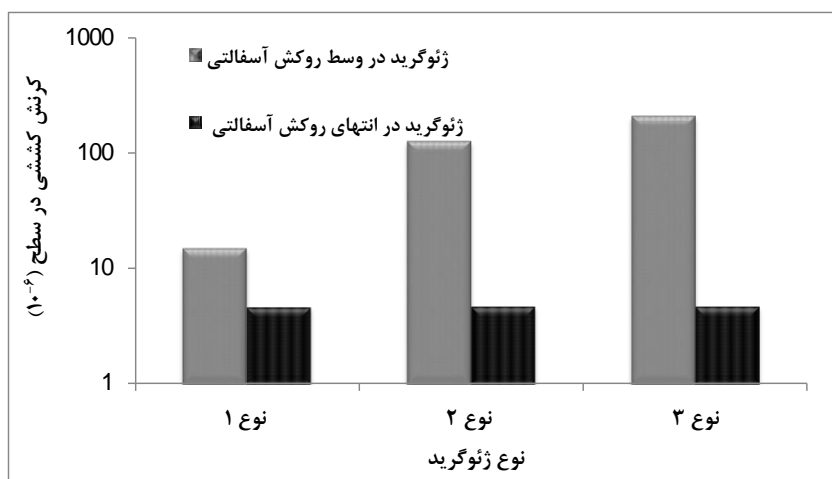


شکل ۹. تاثیر نوع ژئوگرید بر پروفیل تغییر شکل روکش



شکل ۱۰. تاثیر ژئوگرید بر پروفیل تغییر شکل سطح روکش

بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی.....

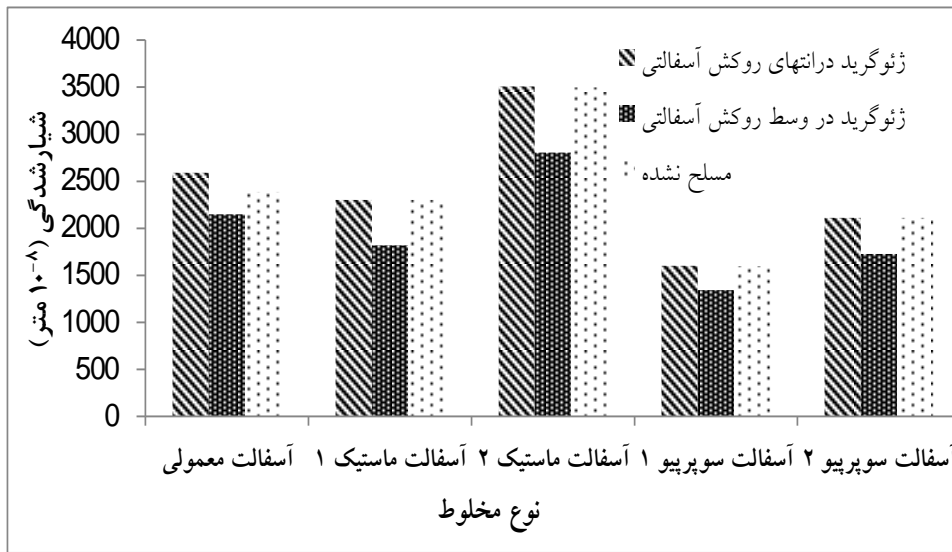


شکل ۱۱. تاثیر نوع و موقعیت ژئوگرید بر کرنش کششی حداکثر در سطح روکش

میباشد، که نشان می دهد تاثیر ژئوگرید در مخلوط های با دانه بندی منقطع بیشتر از دانه بندی پیوسته میباشد. به منظور تعیین تاثیر مسلح سازی با ژئوگرید در ضخامت های مختلف، یک بار دیگر تحلیل ها با استفاده از ضخامت روکش ۶ سانتیمتری از انواع مختلف مخلوطها انجام گرفت. در حالتی که ژئوگرید در زیر لایه آسفالتی قرار گیرد، نتایج نشان داد که تاثیری در کاهش شیار شدگی ندارد. شکل ۱۳ درصد کاهش عمق شیار شدگی برای وقتی که ژئوگرید در وسط لایه آسفالتی در انواع مختلف قرار گیرد را نسبت به حالت مسلح نشده نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، مقدار درصد کاهشها نسبت حالت غیر مسلح، برای وقتی که ژئوگرید در وسط ضخامت روکش قرار می گیرد بیشتر از وقتی است که ضخامت روکش ۵ سانتیمتر میباشد (جدول ۷). بنابراین، تاثیر ژئوگرید در کاهش شیارشدگی در روکشهای با ضخامت بیشتر بالاتر خواهد بود. مقادیر کرنش کششی حداکثر در سطح روکش برای انواع مختلف مخلوطها در حالت مسلح شده و مسلح نشده در شکل های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب مربوط به ضخامت روکش ۵ و ۶ سانتیمتر نشان داده شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، در حالتی که قرار دادن ژئوگرید در پایین روکش تاثیری در مقدار کرنش کششی سطح روکش ندارد، قرار دادن آن در وسط ضخامت روکش باعث افزایش کرنش کششی شده است و این افزایش در انواع مختلف مخلوطها متفاوت میباشد. بیشترین افزایش مربوط به مخلوط ماستیک نوع ۲ بوده و کمترین تغییر مربوط به بتن آسفالتی معمولی است.

تاثیر نوع و موقعیت ژئوگرید بر کرنش کششی حداکثر در سطح روکش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، در حالتی که قرار دادن ژئوگرید در پایین لایه روکش آسفالتی تقریباً تاثیری بر کرنش کششی نداشته است، قرار دادن ژئوگرید در وسط ضخامت روکش آسفالتی باعث افزایش کرنش ها می گردد، و این افزایش با کاهش سختی ژئوگرید بیشتر می شود، به طوری که با قرار دادن ژئوگرید نوع ۳ در وسط روکش آسفالتی مقدار کرنش کششی حدوداً ۵۰ برابر افزایش یافته است که باعث می شود عمر خستگی نیز به شدت کاهش یابد.

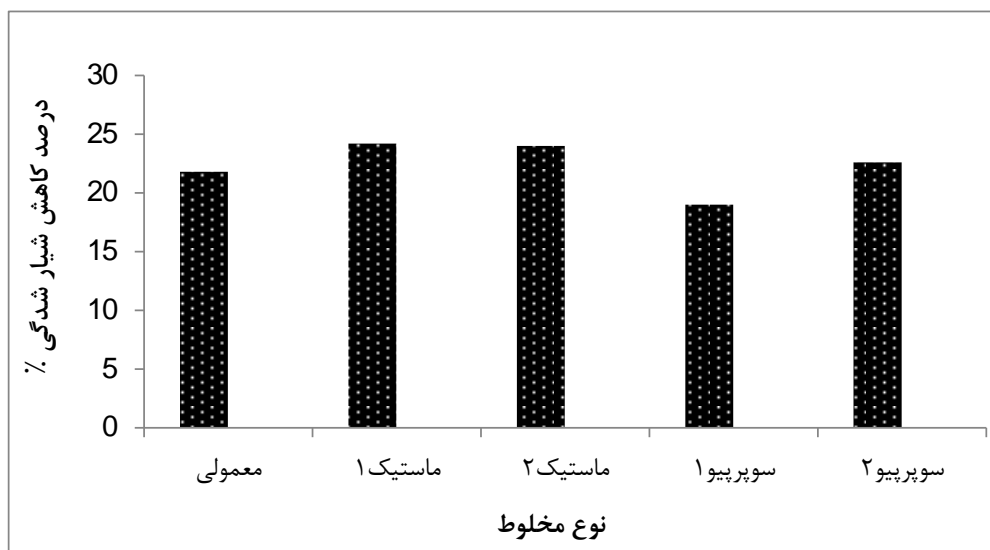
به منظور بررسی تاثیر ژئوگرید بر عمق شیارشدگی و کرنش های کششی حداکثر در سطح مخلوطهای مختلف، روکشهای آسفالتی از انواع مخلوطها با ضخامت ۵ سانتیمتر با ژئوگرید نوع ۲ یک بار در پایین روکش و یک بار در وسط ضخامت روکش مسلح گردیده و نتایج تحلیل به دست آمده اند. شکل ۱۲ مقدار شیار شدگی حداکثر روکش ها را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، قرار دادن ژئوگرید در پایین روکش در هیچکدام از مخلوطها تاثیر بر کاهش شیار شدگی نداشته است. اما، قرار دادن آن در وسط ضخامت روکش باعث کاهش شیار شدگی شده و این تاثیر در انواع مختلف مخلوطها متفاوت میباشد. بررسی مقادیر نشان می دهد که درصد کاهش عمق شیار شدگی نسبت به حالت مسلح نشده، در مخلوطهای مختلف بتن آسفالتی معمولی، ماستیک نوع ۱، ماستیک نوع ۲، سوپرپیو نوع ۱ و سوپرپیو نوع ۲، به ترتیب، ۱۰، ۲۱، ۱۹، ۱۶ و ۱۸٪ میباشد. این مقادیر مربوط به ضخامت روکش ۵ سانتیمتری



شکل ۱۲. تاثیر ژئوگرید بر عمق شیار شیب بر مخلوطهای مختلف

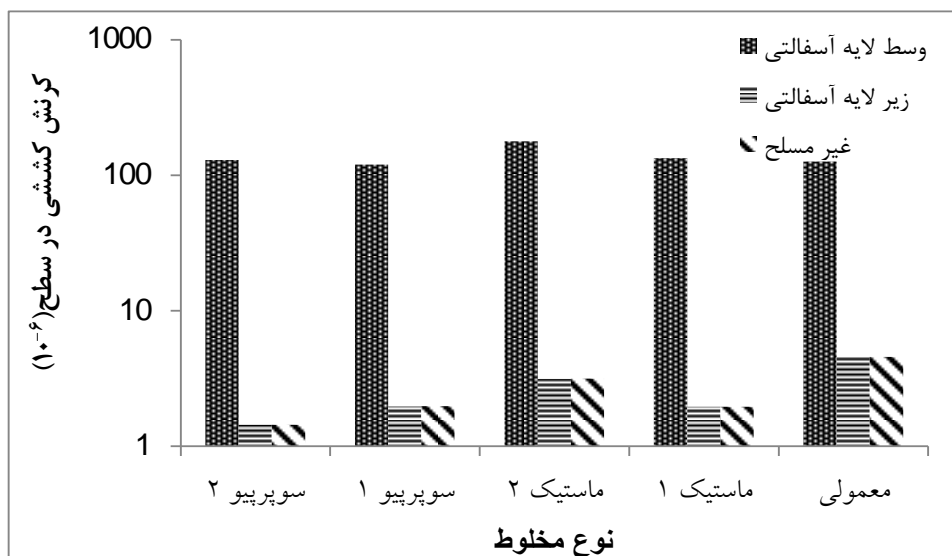
جدول ۷. درصد کاهش شیار شیب با نصب ژئوگرید در روکش ۵ سانتیمتری

نوع مخلوط					موقعیت ژئوگرید
سوپرپیو ۲	سوپرپیو ۱	ماستیک نوع ۲	ماستیک نوع ۱	آسفالت معمولی	
۱۸	۱۶	۱۹	۲۱	۱۰	در وسط لایه آسفالتی
۰	-۰/۲۵	-۰/۲۵	۰	-۷	در پایین لایه آسفالتی

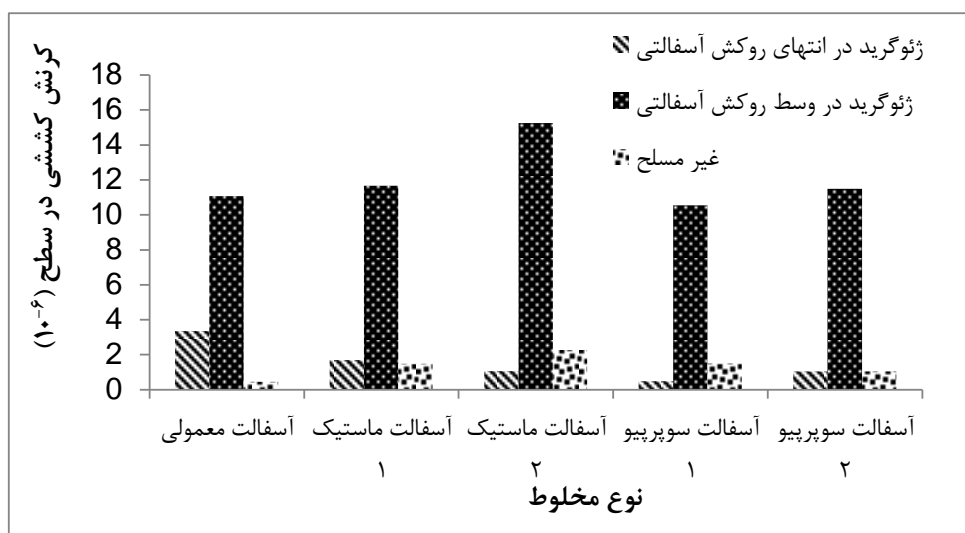


شکل ۱۳. درصد کاهش شیار شیب در روکش به ضخامت ۶ سانتیمتر که ژئوگرید در وسط لایه قرار گرفته است

بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی.....



شکل ۱۴. تاثیر ژئوگرید بر کرنش کششی حداکثر در سطح روکش از مخلوطهای مختلف با ضخامت روکش ۵ سانتیمتر



شکل ۱۵. تاثیر ژئوگرید بر کرنش کششی حداکثر در سطح روکش از مخلوطهای مختلف با ضخامت روکش ۶ سانتیمتر

۳-۳ تاثیر ضخامت لایه ها

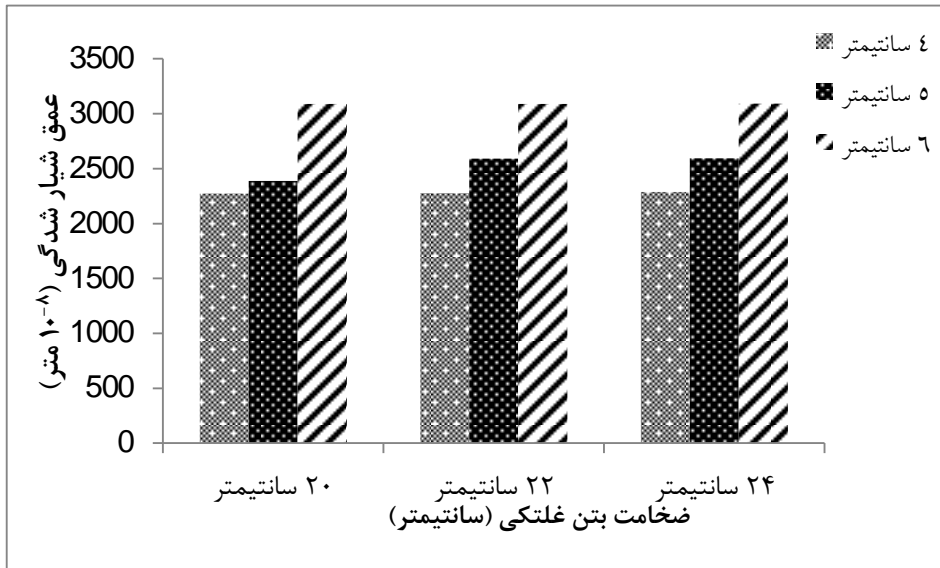
می دهند که تغییر در ضخامت لایه بتن غلتکی تغییر قابل توجهی در مقدار شیار شدگی ایجاد نمی نماید که این موضوع به دلیل سختی بالای این لایه است. همچنین، پروفیل تغییر شکل سطح رویه در ضخامت‌های مختلف آن در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می گردد، مقدار جابجایی مصالح رویه با ضخامت ۶ سانتیمتر بیشترین مقدار است.

شکل ۱۹ تغییرات کرنش کششی در سطح رویه آسفالتی را با ضخامت رویه آسفالتی و لایه بتن غلتکی نشان می دهد. همان‌گونه که ملاحظه می گردد، با افزایش ضخامت لایه رویه

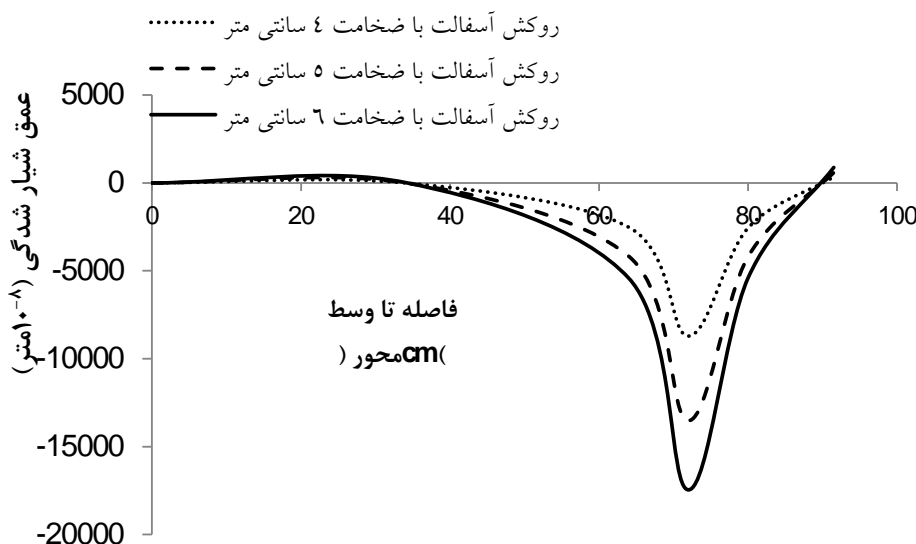
شکل ۱۶ مقادیر شیار شدگی رویه آسفالتی با ضخامت‌های مختلف را در روسازی های با ضخامت‌های مختلف بتن غلتکی نشان می دهد. در این بررسی از مصالح بتن آسفالتی معمولی استفاده گردیده است. همان‌گونه که ملاحظه می گردد، با افزایش ضخامت رویه آسفالتی مقدار شیار شدگی افزایش می یابد. با توجه به این که شیار شدگی ناشی از تغییر شکل دائمی لایه آسفالتی است، و رویه های ضخیم‌تر تغییر شکل بیشتری را خواهند داشت، این نتیجه قابل انتظار است. همچنین، نتایج نشان

مرکب با اساس تثبیت شده با سیمان با افزایش ضخامت رویه آسفالتی و افزایش دما افزایش می یابد. همچنین، نتایج نشان داده شده در شکل ۱۹ بیانگر این است که با افزایش ضخامت بتن غلتکی مقدار کرنش کششی کاهش می یابد، که به دلیل افزایش سختی لایه بتن غلتکی و اثر حمایتی آن در پاسخ های رویه آسفالتی است.

آسفالتی مقدار کرنش کششی در سطح لایه افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش پتانسیل ترک خوردگی خستگی بالا به پایین است. این نتیجه با نتایج تحقیقات قبلی توسط ژائو و همکارانش [Zhao, Alae and Fu, 2017] همخوانی دارد. ژائو و همکارانش با استفاده از تحلیل الاستیک چند لایه ای دریافتند که مقدار کرنش کششی سطح رویه آسفالتی در روسازی های

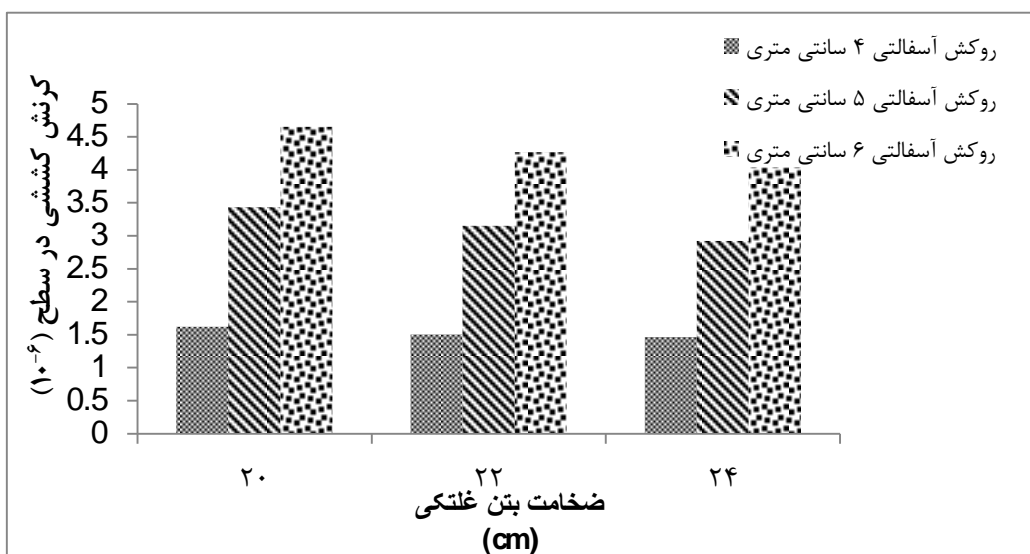


شکل ۱۶. تاثیر ضخامت روکش و لایه بتن غلتکی بر عمق شیاردگی حداکثر



شکل ۱۷. پروفیل تغییر شکل سطح روکش با ضخامتهای مختلف

بررسی شیار شدگی و ترکهای بالا به پایین در روسازی های ترکیبی.....



شکل ۱۹. تاثیر ضخامت روکش و لایه بتن غلتکی بر کرنش کششی حداکثر در سطح روکش

۴. نتیجه گیری

عمر خستگی می گردد. مقدار کاهش در عمر خستگی با کاهش سختی ژئوگرید افزایش می یابد.

- مقدار کاهش در شیار شدگی با استفاده از ژئوگرید در مخلوطهای مختلف متفاوت است و بیشترین تاثیر برای مخلوط ماستیک درشت دانه نوع ۱ است و کمترین تاثیر برای مخلوط بتن آسفالتی معمولی است.

- قرار دادن ژئوگرید در وسط ضخامت رویه باعث کاهش عمر خستگی و قرار دادن آن در پایین رویه تاثیری در عمر خستگی ندارد.

- مقدار تاثیر ژئوگرید بر مقدار شیار شدگی و عمر خستگی به ضخامت رویه بستگی دارد. با افزایش ضخامت رویه تاثیر مسلح سازی با ژئوگرید افزایش می یابد.

- مقدار شیارشدگی رویه به ضخامت لایه بتن غلتکی بستگی ندارد و با افزایش ضخامت رویه آسفالتی افزایش می یابد.

- عمر خستگی رویه آسفالتی با افزایش ضخامت رویه آسفالتی کاهش و با افزایش ضخامت لایه بتن غلتکی افزایش می یابد.

- برای رسیدن به حالت بهینه برای بکارگیری در عمل، پیشنهاد می گردد که ارزیابی اقتصادی طرحهای مختلف بررسی شده در این تحقیق با ارزیابی عملکرد بلندمدت روسازی و تحلیل چرخه عمر آنها انجام گیرد.

در این تحقیق اثر عوامل مختلف بر روی خرابی شیارشدگی و ترک خوردگی خستگی بالا به پایین در روسازی ترکیبی با اساس بتن غلتکی، با استفاده از مدلسازی سه بعدی با روش المانهای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور خلاصه نتایج زیر از این تحقیق به دست آمده اند:

- میزان شیار شدگی و عمر خستگی رویه آسفالتی به نوع مخلوط مورد استفاده در رویه بستگی زیادی دارد به طوری که کمترین مقدار شیار شدگی در مخلوطهای مورد بررسی در این تحقیق برای مخلوط سوپریو نوع ۱ و بیشترین آن برای ماستیک درشت دانه نوع ۲ است. همچنین، کمترین کرنش کششی در سطح رویه برای مخلوط سوپریو نوع ۲ و کمترین آن برای بتن آسفالتی معمولی به دست آمد.

- قرار دادن ژئوگرید در زیر رویه آسفالتی تاثیری در مقدار شیار شدگی رویه ندارد و قرار دادن آن در وسط رویه باعث کاهش شیار شدگی می گردد و مقدار کاهش با افزایش سختی ژئوگرید افزایش می یابد. به طوری که، نسبت به حالت غیر مسلح، درصد کاهش شیار شدگی با به کارگیری ژئوگرید با سختی های ۰/۵۱۶، ۰/۴۲۶GPa و به ترتیب، ۳۱، ۲۱/۷ و ۶٪ است.

- قرار دادن ژئوگرید در زیر رویه باعث افزایش عمر خستگی و قرار دادن آن در وسط ضخامت رویه باعث کاهش

method for hot mix asphalt – part 22: Wheel tracking test”, prEN 12697-22 Standard.

-Famili, A. and Vafaei, M. (2016) "Numerical analysis of roller compacted concrete pavement" Saudi Journal of Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, pp 20-25.

-Gilchrist, D., Hartman, M., Mahony, J. O., Owende, M. O. and Ward, M. (2001) "Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure", Journal of Transportation Engineering, Vol. 127, No.3, pp. 254-262.

-Hazaree, C., Ceylan, H. and Wang, K. (2011) "Influences of mixture composition on properties and freeze–thaw resistance of RCC" Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 313-319.

-Hua, J. (2000) "Finite element modeling and analysis of accelerated pavement testing devices and rutting phenomenon”, Ph.D. Thesis, Purdue University, USA.

-Huang, Y.H.(2004) "Pavement analysis and design" 2nd ed. Upper Saddle River, NJ Prentice Hall.

-Hugo, F. and Kennedy, T.W. (1985) "Surface cracking of asphalt mixtures in Southern Africa." Journal of the Asphalt Paving Technologists, No.54, pp.454–501.

-Khabiri, M. M. (2011) "Geosynthetic material suitable depth staying to control failure of pavement rutting”, Advanced Materials Research, Vols. 255-260, pp. 3454-3458.

-Khodakarami, M. I. and Khakpour Moghaddam, H. (2017) "Evaluating the performance of rehabilitated roadway base with geogrid reinforcement in the presence of soil-geogrid-interaction”, Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, Vol.5, No.1, pp.33-46.

-Kokubu, K., Cabrerab, J. G. and Uenoa, A. (1996) "Compaction properties of roller compacted concrete" Journal of Cement And Concrete Composites, Vol. 18, pp109-117.

۵. مراجع

- نشریه ۳۵۴ (۱۳۸۸) "راهنمای طرح و اجرای بتن غلتکی" سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

- طاهرخانی، ح.، مرادلو، ا. م.، جلالی چیرندهی، م. (۱۳۹۵) "بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ های روسازی های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک به روش المانهای محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS" مجله مهندسی حمل و نقل، دوره ۸، شماره ۲، ص ۳۴۲-۳۲۳.

- طاهرخانی، ح.، خالقی، ح. (۱۳۹۵) " بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود"، مجله مهندسی حمل و نقل، دوره ۸، شماره ۱، ص ۱۹۴-۱۷۵.

- مدرس، ا. و حسینی، س. ز. (۱۳۹۴) " بررسی خصوصیات رفتاری بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی" مجله مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۲، ص ۳۱۳-۲۹۷.

-Baek J. (2010) "Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques" PhD dissertation. Urbana, Champaign: University of Illinois.

-Brown, R., Hainin, M. R., Cooley, L.A. and Rodriguez, F. (2005) "Determining minimum lift thickness for hot mix asphalt mixtures" Journal of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, No. 7, pp. 23-66.

-Ceylan, H., Mathews, R., Kota, T., Gopalakrishnan, K. and Coree, B. J. (2005) "Rehabilitation of concrete pavements utilizing rubblization and crack and seat methods", Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, report no IHRB Project TR-473.

-European Committee for Standardization, CEN, (2004) "Bituminous mixtures – test

HMA/PCC Composite Pavement, Vol. 1, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC.

-Uhlmeier, J. S., Willoughby, K., Pierce, L. M. and Mahoney, J. P. (2000) "Top-down cracking in Washington state asphalt concrete wearing courses", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1730, pp.110-116.

-Uzarowski, L. (2006) "the development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting" Ph.D Dissertation, University of Waterloo, Canada.

-Vahedifard, F. and Mahmoud Nili, M. (2010) "Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the Performance of low-cement roller compacted concrete pavement", Journal of Construction and Building Materials, Vol. 24: pp. 2528-2535.

-Von Quintus H. L., Mallela J., Weiss W. and Shen S. (2007) "Techniques for mitigation of reflective cracking", . Champaign, I. L., USA: Applied Research Associates; Interim report AAPTP 05-04.

-Yun, T., Lee, O., Lee, S. W., Kim, I. T. and Cho, Y. H. (2011) "A performance evaluation method of preformed joint sealant: slip-down failure" , Construction and Building Materials Vol. 25, pp 1677-1684.

-Zhao, Y., Alae, M. and Fu, G. (2017) "Investigation of mechanisms of top-down fatigue cracking of asphalt pavement", Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2017.1303394. pp.

-Koohmishi, M. (2013) "Evaluation of application of roller compacted concrete versus asphalt concrete as pavement surface layer for high traffic volume routes", Journal of Basic and Applied Science Research, Vol. 3, No. 5, pp. 303-305.

-Krishna Rao, S., Sravan, P. and Chandrasekhar Rao, T. (2016) "Abrasion resistance and mechanical properties of roller compacted concrete with GGBS" , Construction and Building Materials, Vol. 114, pp. 925-933.

-Li, S., Liu, X. and Liu, Z. (2014) "Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement" Construction and Building Materials, Vol. 68, pp. 341-347.

-Nunez, O. (2007) "Composite pavements: A technical and economic analysis during the pavement type selection process", Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

-Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, D. and Gagne, R. (2017) "Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study" Construction and Building Materials, Vol. 133, pp. 450-458.

-Rahman, M. T., Mahmoud, K. and Ahsan, S. (2011) "Stress-strain characteristics of flexible pavement using finite element analysis", International Journal of Civil and Structural Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 233-240.

-Rith, M., Kim, Y. K., Hong, S. J. and Lee, S. W. (2016) "Effect of horizontal loading on RCC-base composite pavement performance at heavy duty area", Construction and Building Materials, Vol. 131, pp. 741-745.

-SHRP (Strategic Highway Research Program), (2013) "Composite pavement systems –

حسن طاهرخانی، الهه خیره

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه تربیت مدرس تهران. اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه ناتینگهام انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد وی، مصالح و مواد روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه زنجان است.



الهه خیره، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه غیر انتفاعی کرج و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۵ را از دانشگاه زنجان اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی راه است.