

بررسی عملکرد سطحی آسفالت حفاظتی چپ سیل

بر روی اساس تثبیت شده سیمانی

مقاله پژوهشی

علی بردیونس، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۱/۳۱ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۸

صفحه ۱۴۸-۱۳۵

چکیده

چپ سیل با پخش مصالح دانه‌ای بر روی قیر امولسیون برای حفاظت رویه‌های سطحی اجراء می‌شود. مهمترین خرابی چپ سیل کنده شدن سنگدانه از سطح رویه می‌باشد در این مطالعه سعی شد برخی از این عوامل شامل نوع قیر، نوع دانه بندی و درصد قیر در وقوع این خرابی بررسی شود. رویه‌ای که چپ سیل بر روی آنها اجرا شده، اساس تثبیت شده با سیمان و قیر مورد استفاده در این تحقیق شامل دو نوع قیر امولسیون و امولسیون با پودر لاستیک است و دانه بندی مورد استفاده نشریه شماره ۲۳۴ در طراحی چپ سیل شامل سه نوع دانه بندی می‌باشد که در این تحقیق از دانه بندی نوع (ج) که ریز ترین دانه بندی می‌باشد استفاده شد. با توجه به اینکه سطح رویه تثبیت شده، یک سطح صاف و بدون خلل و فرج می‌باشد از یک نوع دانه بندی پیشنهادی که در مطالعه حاضر تحت عنوان دانه بندی نوع (د) مطرح شده است استفاده شد. در این تحقیق از آزمایش جاروب و آزمایش پخش ماسه برای بررسی عملکرد سطحی رویه بهره گرفته شد. از آزمایش جاروب برای مقایسه تاثیر نوع دانه بندی، درصد قیر، نوع قیر و لایه زیرین چپ سیل استفاده شد همچنین از آزمایش پخش ماسه به منظور بررسی نوع دانه بندی و تاثیر درصد قیر در عمق بافت چپ سیل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از قیر امولسیون با پودر لاستیک باعث کاهش تقریباً ۲۰ الی ۲۳ درصد از دست رفتن سنگدانه در سطح چپ سیل می‌شود. همچنین میزان کنده شدن سنگدانه با ریزتر شدن دانه بندی رابطه مستقیم دارد و بطور متوسط ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش پخش ماسه نشان داد که استفاده از چپ سیل بر روی اساس سیمانی باعث افزایش مقاومت لغزندگی رویه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش جاروب، اساس تثبیت شده سیمانی، چپ سیل، قیر امولسیون با پودر لاستیک، کنده شدن سنگدانه

۱- مقدمه

استفاده از چپ سیل^۱ در دهه ۱۹۶۰ میلادی و عمدتاً به صورت ایجاد یک پوشش برای جاده‌های شنی با حجم ترافیک کم بود. از آن زمان به بعد استفاده از چپ سیل به عنوان یک لایه محافظ بر روی جاده‌هایی با حجم ترافیک کم و زیاد مورد استفاده قرار گرفت. محبوبیت چپ سیل به هزینه کم آن و افزایش عمر روسازی بر می‌گردد. معمولاً در موقع اجرای چپ سیل از امولسیونهای قیری تند شکن^۲ استفاده می‌شود. چپ سیل در هر زمان از عمر روسازی قابل اجرا

است. دلیل اصلی استفاده از چپ سیل روی یک رویه بتنی، آبد کردن سطح و افزایش ضریب اصطکاک است. چپ سیل یک غشاء ضد آب روی سطح راه ایجاد می‌کند که نه تنها نفوذ پذیری سطح را کاهش داده بلکه موجب افزایش ضریب اصطکاک سطح راه یا افزایش مقاومت آن در برابر سرخوردگی می‌گردد. بعضی از مؤسسات، چپ سیل را یک روش نگهداری پیشگیرانه می‌دانند [Hicks, Moulthrop and Daleiden 1999]. امروزه دلایلی همچون هزینه و

اندودهای حفاظتی بدون سنگدانه استفاده می‌شود. طی سالهای اخیر استفاده از آسفالت حفاظتی چپ‌سپیل، در نگهداری و ترمیم راه مورد توجه قرار گرفته‌است [Gransberg, 2005, Tufuor, Rilett and TenHulzen, 2017].

خرابیهایی که در سطح چپ‌سپیل اتفاق می‌افتد شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. رگه‌ای شدن

۲. قیر زدگی

۳. جداشدن مصالح از سطح راه^۵

متداول‌ترین مشکل و به نوعی بدترین آنها، جدا شدن سنگدانه‌های پوششی از سطح چپ‌سپیل می‌باشد [Adams et al. 2017]. از جمله علتهای اصلی جداشدن مصالح از سطح راه، می‌توان به موارد، استفاده از قیر ناکافی، غلتک‌زنی ضعیف در قسمت درز طولی مرکزی، عمل‌آوری مخلوط قیری قبل از پخش سنگدانه‌ها و غلتک‌زنی آنها، سنگدانه‌های کثیف و دارای گرد و غبار، دانه‌بندی ضعیف، عملکرد نامناسب دستگاههای برفروب اشاره کرد [Shuler, 2011].

در سال ۲۰۱۱ بر روی تاثیر عملکرد چپ‌سپیل بر روی روی اساس تثبیت شده با سیمان به صورت آزمایشگاهی، تحقیقاتی توسط ویلسون و همکاران انجام شد [Wilson and Guthrie, 2011]. در سال ۲۰۰۹ به دلیل محدودیتهای مالی و زیست محیطی بر روی مسیر دسترسی به معدن زغال‌سنگ در ایالت ویومینگ^۶ ایالات متحده آمریکا، از یک لایه اساس تثبیت شده با سیمان استفاده شد. به منظور آبیند کردن مسیر، جلوگیری از فرسایش و افزایش ضریب اصطکاک از یک لایه چپ‌سپیل بر روی آن استفاده شد. البته نحوه طراحی به گونه‌ای بود که کلیه بارهای اعمالی توسط لایه اساس سیمانی تحمل می‌شد [Okunade, 2010].

۱ مطالعه حاضر در قالب آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی انجام شده است، به دلیل گستردگی متغیرها این مقاله تنها جنبه‌های آزمایشگاهی این مطالعه را پوشش می‌دهد. با توجه به بررسی مطالعات انجام شده، و اینکه به مشکلات

آثار زیست محیطی، استفاده از سیمان به عنوان بالابردن ظرفیت باربری لایه‌های روسازی رواج پیدا کرد [Mihyeon and Amekudzi, 2005]. از لایه اساس سیمانی با دانه‌بندی‌های مختلف به صوت گسترده‌ای در کشورهای مختلف، در روسازی‌های انعطاف‌پذیر وصلب استفاده می‌شود [Lim, S., & Zollinger, D., 2003]. مصالح شنی مناسب را می‌توان با سیمان تثبیت کرده و از آن به عنوان یک لایه باربر نسبتاً خوب در زیر رویه‌هایی همچون بتنی و آسفالتی به عنوان روسازی مرکب، استفاده کرد. همچنین در راههای فرعی^۳، راههای روستایی و مسیرهایی که دارای ترافیک کمی هستند استفاده از اساس سیمانی^۴ به عنوان یک راهکار مناسب برای احداث این نوع راهها می‌باشد. مقاومت مصالح اساس سیمانی بستگی به جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد سیمان، کیفیت اختلاط، شرایط عمل آوردن مخلوط، میزان تراکم و زمان دارد. نحوه طراحی اساس سیمانی بر اساس دستیابی به مقاومت مناسب، دوام و کاهش ترکهای انقباضی است. در گذشته تفکر "مقاومت زیاد" اغلب بر طراحی حاکم بود و در نتیجه باعث افزایش سیمان مصرفی برای ساخت اساس سیمانی می‌شد. استفاده از سیمان بیش از حد مشکلاتی همچون افزایش ترکهای انقباضی و عملکرد ضعیف روسازی را به همراه دارد.

بنابراین محققین به این باور رسیده‌اند که باید بین مقاومت و ترکهای انقباضی یک تعادل مناسب اجرا کنند. در این راستا انجمن سیمان پرتلند یک مقاومت مورد نیاز بین ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را توصیه می‌کند [Raad, et al. 1988]. مسئله نگهداری پیشگیرانه و روشهای مرمت روسازی همیشه مورد توجه محققین بوده‌است، استفاده از روش‌های نگهداری پیشگیرانه از مهمترین ابزارهای کنترل فرایند تخریب و بهبود ویژگی‌های عملکردی رویه‌های آسفالتی مانند تاب لغزشی و کیفیت رانندگی می‌باشد [Gransberg, 2005; khabiri, 2016]. بدین منظور اغلب از آسفالت‌های حفاظتی مانند دوغاب آبیندی، اندودهای سنگدانه‌های، آسفالت نازک سطحی و

شد. برای تولید قیر امولسیون با پودر لاستیک، ابتدا قیر و پودر لاستیک در گرمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت توسط یک مخلوط‌کن آزمایشگاهی با دور rpm ۱۲۰۰ مخلوط شدند. بعد از آن مخلوط قیر و پودر لاستیک با استفاده از دستگاه امولسیون ساز در مقیاس آزمایشگاهی به مقدار ۱۰ کیلوگرم قیر تولید شد. دلیل استفاده از قیر امولسیون H2-CMS این است که با افزودن پودر لاستیک به قیر امولسیون ناپایداری قیر و احتمال ته نشین شدن آن افزایش می‌یابد به همین دلیل از قیر امولسیون کند شکن استفاده شد. جدول ۱، مشخصات قیر امولسیونی مورد استفاده را نمایش می‌دهد. در اصل با افزودن پودر لاستیک نوع قیر امولسیونی و رفتار آن تغییر خواهد کرد، که در ادامه بخشی از آزمایش‌ها رفتار چسبندگی این قیر را کرده‌است.

جدول ۱. مشخصات فنی قیرهای مصرفی در ساخت نمونه‌های

چیپ‌سیل

نوع قیر		آزمایش
CMS-2h با	CRS-1	
۵ درصد پودر لاستیک	۵۶	کندروانی سی بولت فیبرل در ۵۰ درجه سانتیگراد (ثانیه)
	۴۳	درصد قیر
	۶۵	پایداری در برابر ته نشینی
	حد اکثر ۱	مانده روی الک
	حد اکثر ۰/۱ درصد	درصد حجمی روغن امولسیون در آزمایش تقطیر
	حد اکثر ۱۲	درجه نفوذ (یک دهم میلیمتر)
	۵۳	آزمایش قیر باقیمانده از
	۶۰	تقطیر
	۹۸	حلالیت در تری کلرور اتیلن (%)

برهمکنش داخلی بین ذرات پودر لاستیک و قیر از نوع فیزیکی است ذرات پودر لاستیک در حین نفوذ، بخشی از

کنده شدن سنگدانه‌ها از روی اساسهای تثبیت شده در تحقیقات قبلی کمتر پرداخته شده، بررسی راه حل پیشنهادی که این تحقیق به دنبال آن می‌باشد، از اهداف این مطالعه هست. با این توضیحات مطالعه‌ی حاضر استفاده از قیر امولسیونی و استفاده از آزمایش جاروب سنگدانه را به عنوان موضوعاتی که کمتر مورد توجه محققین بوده بررسی کرده است.

۲- روش تحقیق و مصالح مورد استفاده

در این مطالعه مصالح مختلفی نظیر سنگدانه، قیر و سیمان استفاده شد که در ادامه معرفی می‌شوند، همچنین روشهای استاندارد و چارچوب کلی این پژوهش در ادامه‌ی آن شرح داده می‌شود.

۲-۱- شناخت مصالح

۲-۱-۱ قیر

استفاده و بررسی اثرات وجود پودر لاستیک در مصالح و پروژه‌های عمرانی در مطالعات اخیر مورد توجه قرار گرفته است [khisdari, Khabiri and gheibi,2017,Tabatababai and Kamali,2003].

در این تحقیق از قیر امولسیون H2-CMS و قیر امولسیونی با ۵ درصد پودر لاستیک استفاده شد. پودر لاستیک مورد استفاده از نوع پودر لاستیک قابل بازپخت نوع Kt-ml تولید شرکت یزد تایر است در تحقیقی، که در سال ۱۳۹۲ انجام شد با افزودن ۲۰ درصد پودر لاستیک به قیر خالص مقدار نیروی لازم برای کندن سنگدانه در ماکزیمم مقدار خود قرار گرفت [Taerian, Abtahi and Hejazi,2015]. در این تحقیق با توجه به اینکه قیر امولسیون مورد استفاده دارای ۶۵ درصد قیر خالص است و همچنین در قیرهای امولسیون افزودن بیش از حد پودر لاستیک، باعث ناپایداری قیر امولسیون می‌شود، در نتیجه تنها از ۵ درصد وزن کل قیر پایه، قبل از تولید قیر امولسیونی به آن پودر لاستیک اضافه

فرج کم است. هر قدر سنگدانه انتخابی ریزتر باشد تعداد سنگدانه‌ای که در تماس با چرخ خودرو قرار می‌گیرند بیشتر است و در نتیجه به سنگدانه نیروی کمتری وارد می‌شود. عامل دیگر این بود که هرچه قدر سنگدانه انتخابی ریزتر باشد ایمنی راه افزایش می‌یابد (هرچه قدر سنگدانه ریزتر باشد، خسارات ناشی از پرتاب سنگدانه به وسایل نقلیه کاهش می‌یابد). در همین راستا تصمیم گرفته شد که در ساخت نمونه‌ها سنگدانه جدید نوع (د) نیز ایجاد شود که دانه بندی آن با طبق روند ریزتر شدن دانه بندی جداول استاندارد موجود در نشریه ۲۳۴ می‌باشد. نتایج آزمایشهای مشخصات فیزیکی مصالح در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. دانه بندی‌های یک اندازه مصالح چپ‌سیل و مشخصات مصالح سنگدانه‌ای مورد استفاده

دانه بندی		اندازه الک
د	ج	
	۱۰۰	۱۲/۵ میلیمتر (۳/۴ اینچ)
۱۰۰	۸۵-۱۰۰	۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)
۸۵-۱۰۰	۰-۲۵	الک شماره ۳ (۵/۶ میلیمتر)
۰-۲۵	۰-۱۰	الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلیمتر)
۰-۱۰	۰-۱	الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلیمتر)
۰-۱/۵	۰-۰/۵	الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلیمتر)

۲-۱-۳ سیمان

مواد سیمانی بکار برده شده در ساخت نمونه‌ها، سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی مورد استفاده است. سیمان پرتلند مورد استفاده باید الزامات استاندارد ASTM C150 را ارضا نماید [ASTM C150, 2007]. مشخصات این سیمان در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

آروماتیکها (روغن) را در خود جذب می‌کند که سبب تورمشان می‌شود و اندازه آن‌ها بستگی به دما دارد. سطح پودر لاستیک قبل از اختلاط با قیر واضح، آسیب دیده و پر از خلل و فرج می‌باشد. بعد از اختلاط سطح ذرات پودر لاستیک نامعلوم است و اثری از خلل و فرج دیده نمی‌شود، نتایج داده‌های آزمایشگاهی کارخانه تولیدکننده با نتایج سایر محققین همسو است [Huang, W., et. al. 2017].

جذب روغن فاز مالتن توسط پودر لاستیک سبب افزایش ویسکوزیته می‌شود. سطح ذرات پودر لاستیک بیشترین تاثیر را در برهمکنش دارد. با افزایش سطح ذرات برهمکنش افزایش پیدا می‌کند. هر چه میزان خروج استن بیشتر باشد میزان رزین دوستی در پودر لاستیک بیشتر است. نفوذ پودر لاستیک در قیر بیشتر می‌شود و از طرف دیگر هیدروکربورهای اشباع و آروماتیکها می‌توانند آن را متورم کنند. تورم بیشتر پودر لاستیک همزمان با نفوذ دو طرفه سبب افزایش بهبود یافتگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک می‌شود [Mohd Rasdan et al., 2013; Navarro et al., 2007]. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که با افزایش درصد پودر لاستیک در قیر میزان درجه نفوذ کاهش و نقطه نرمی و بازگشت پذیری لاستیک افزایش می‌یابند. نقطه نرمی قیر مشخصه‌ای برای تشخیص دمای روان شدن قیر می‌باشد و در نتیجه میزان مقاومت آسفالت را در برابر شیارشدگی و تغییر شکل دائمی تخمین می‌زند [Tabatabaai and Kamali, 2003].

۲-۱-۲ سنگدانه

با توجه به نزدیک کردن شرایط این تحقیق به شرایط واقعی سعی شد از جداول و دستورالعملهای رایج کشور استفاده شود، در توضیح جدول ۲ نیاز است، اشاره کرد که در نشریه شماره ۲۳۴ سه نوع دانه بندی با شماره‌های (الف)، (ب) و (ج) برای چپ‌سیل وجود دارد. دلیل انتخاب دانه بندی نوع (ج) در ساخت نمونه‌های چپ‌سیل این بود که اساس تثبیت شده تقریباً دارای یک سطح صاف و خلل و

۲-۲ ساخت اساس تثبیت شده با سیمان و اجرای

چیپ سیل بر روی آن

مصالح شنی با کیفیت نسبتاً خوب را می‌توان با سیمان تثبیت کرده و از آن برای ایجاد لایه‌های اساس با قابلیت باربری زیاد استفاده کرد. از لایه‌های اساس سیمانی برای روسازی‌های بتنی و آسفالتی استفاده می‌شود [Guthrie and Rogers, 2010]. مقاومت مصالح اساس سیمانی بستگی به جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد سیمان، کیفیت اختلاط، شرایط عمل آوردن مخلوط، میزان تراکم و زمان دارد. از مهمترین عواملی که بر روی مقاومت اساس سیمانی تاثیر دارد نسبت گرد مصالح سنگی است. طبق تعریف نسبت گرد مصالح سنگی عبارت است از نسبت درصد وزنی مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ به درصد وزنی مصالح رد شده از الک شماره ۳۰ (نسبت وزن ریزدانه به وزن ریزدانه و ماسه).

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگدانه‌ای مورد استفاده

نتایج آزمایش	روش آزمایش		مجاز	شرح
	ASTM	AASHTO		
۱۹	C131	T96	۲۵	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس، درصد
۲/۲	C127	T85	۲/۵	حداکثر جذب آب، درصد (مصالح درشت دانه)
۲/۴	C128	T84	۲/۵	حداکثر حد آب، درصد (مصالح ریزدانه)
۶	-	-	-	حداکثر ضریب تورق با روش BS812، درصد
۹۲				درصد شکستگی در یک وجه
۹۷				درصد شکستگی در دو وجه

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه

سیمان مورد استفاده

مقدار	ویژگی فیزیک
۲۸۰۰	سطح مخصوص ۱ سانتی متر مربع بر گرم
۰/۸	انبساط آزمایش اتوکلاو درصد
۴۵	زمان گیرش با سوزن اولیه (به دقیقه)
۶	ویکات نهائی (ساعت)
۱۰۰	سه روزه
۱۷۵	هفت روزه
۳۱۵	۲۸ روزه
۷۰	حرارت هیدراتاسیون (کالری بر گرم)

با افزایش نسبت گرد مصالح سنگی بر مقاومت فشاری اساس تثبیت شده با سیمان نیز اضافه می‌شود. برای اجرای لایه اساس طبق نشریه شماره ۲۳۴ پنج نوع دانه بندی برای لایه اساس ارائه شده است. در این مطالعه به دلیل خرابی

جدول ۴. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

کارخانه سیمان مورد استفاده

نوع آزمون	مقدار (درصد)	اختصار	ویژگی‌های شیمیایی
	۲۰/۰۰	SiO ₂	اکسید سیلیسیم
	۶/۰۰	Al ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم
	۶/۰۰	Fe ₂ O ₃	اکسید آهن
	۵	MgO	اکسید منیزیم
طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۹۲	۳/۰۰	SO ₃	تری اکسید گوگرد
	۳/۰۰	-	کسر وزن در اثر سرخ شدن
	۰/۷۵	-	باقیمانده نامحلول
	۸/۰۰	C ₃ A	سه کلسیم آلومینات

درصد سیمان برای ساخت اساس تثبیت شده با سیمان استفاده شد.

جدول ۷. درصد وزنی مناسب سیمان برای تثبیت انواع خاک‌ها

حدود درصد وزنی سیمان	گروه یونیفاید	گروه آشتو
۵	GM, SW, SP, SM, GW, GP	A-۱-a
۶	GP, GM, SP, SM	A-۱-b
۷	GM, GC, SM, SC	A-۲
۹	SP	A-۳
۱۰	ML, CL	A-۴
۱۰	ML, MH, CH	A-۵
۱۲	CL, CH	A-۶
۱۳	ML, CH	A-۷

برای تعیین درصد رطوبت بهینه نمونه‌های اساس تثبیت شده با سیمان مطابق استاندارد ASTM D1557 ساخته و مورد تراکم قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۸ و به صورت ترسیم در شکل ۱ نشان داده شده است [ASTM D1557-12, 2012]. همان طور که از شکل ۱ مشخص است در میزان رطوبت ۵/۶ درصد میزان چگالی خشک به حداکثر خود رسیده است. بنابراین رطوبت بهینه برای ساخت نمونه‌های اساس سیمانی را ۵/۶ درصد در نظر گرفته می‌شود.

کنده شدن سنگدانه در چپ‌سیل که شایع‌ترین خرابی در چپ‌سیل است، از دانه‌بندی شماره V به این دلیل که نسبت به دانه‌های دیگر ریزتر است و در نتیجه سطح آن صیقلی‌تر و دارای پستی و بلندی بافتی کمتر نسبت به دانه‌بندی‌های دیگر است، استفاده شد. در جدول ۶ مشخصات دانه‌بندی استفاده شده در ساخت اساس تثبیت شده با سیمان آورده شده است [Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234, 2011].

جدول ۶. دانه بندی مورد استفاده در ساخت اساس تثبیت

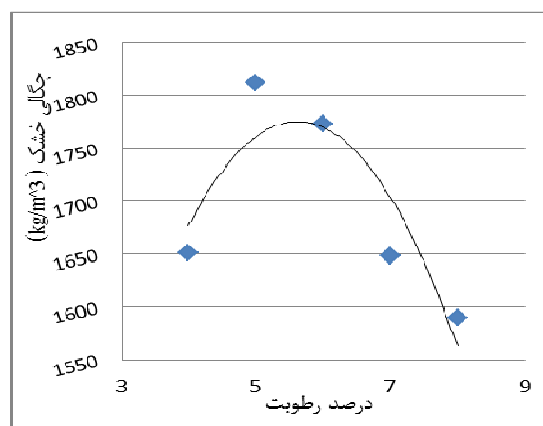
شده با سیمان

شماره الک	۲۵ میلیمتر	۹/۵ میلیمتر	۴/۷۵ میلیمتر	شماره ۱۰	شماره ۴۰	شماره ۲۰۰
درصد وزنی	۱۰۰	۶۷/۵	۵۰	۳۷/۵	۲۲/۵	۵

از نظر فنی و اقتصادی مصالح و سنگدانه‌هایی که اندازه درشت‌ترین دانه آن‌ها کوچکتر از ۵۰ میلیمتر و حداقل ۵۵ درصد وزنی آن‌ها از الک شماره ۴ و حداقل ۳۵ درصد وزنی آن‌ها از الک شماره ۱۰ عبور می‌کند بهترین گزینه برای تثبیت با سیمان محسوب می‌شوند. خاک‌هایی که در طبقه بندی آشتو در گروه A۱ تا A۷ قرار می‌گیرند قابلیت تثبیت با سیمان را دارند. جدول ۷ حدود درصدهای مناسب سیمان برای خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد [Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234, 2011]. با توجه به اینکه دانه‌بندی اساس مورد استفاده در این تحقیق در گروه خاک‌هایی با دانه بندی A۱ قرار می‌گیرد بنابراین از ۵

جدول ۸. نتایج حاصل از آزمایش تراکم نمونه‌های اساس تثبیت شده با سیمان

وزن مخصوص خشک حداکثر (کیلوگرم/متر مکعب)	وزن مخصوص نمونه خشک متراکم شده (کیلوگرم/متر مکعب)	جرم حجمی مرطوب نمونه متراکم شده (کیلوگرم/متر مکعب)	وزن قالب (کیلوگرم)	وزن نمونه مرطوب با قالب (کیلوگرم)	درصد رطوبت
۱۶۵۲	۱۶۷۴	۱۷۴۰/۵	۶/۳۰۶	۱۰	۴
۱۸۱۲	۱۸۲۸	۱۹۲۹/۱۵	۶/۳۰۶	۱۰/۴	۵
۱۷۷۳	۱۷۹۷	۱۹۰۵/۶۹	۶/۳۰۶	۱۰/۳۵	۶
۱۶۴۸	۱۶۷۱	۱۷۸۷/۴۱	۶/۳۰۶	۱۰/۱	۷
۱۵۹۰	۱۶۱۲	۱۷۴۰/۵	۶/۳۰۶	۱۰	۸



شکل ۱. چگالی خشک نمونه‌های اساس تثبیت شده با سیمان بر اساس درصد رطوبت



شکل ۲. تصویری از نمونه اساس تثبیت شده سیمانی

برای ساخت نمونه‌های اساس تثبیت شده با سیمان باید ابعاد نمونه‌ها رادر مقیاس دستگاه آزمایش جاروب (ASTM D7000 - 04) ساخت. در این راستا ابعاد نمونه‌های ساخته شده به صورت استوانه‌ای با قطر ۲۵ و ارتفاع ۱۱/۶ سانتیمتر ساخته شد. برای تراکم، نمونه‌ها در پنج لایه و هر لایه ۱۵۰ ضربه ساخته شد [ASTM D7000-04,2004]. در شکل (۲) نمونه‌های اساس سیمانی ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۳. دستگاه آزمایش جاروب ساخته شده در آزمایشگاه

دانشگاه

۲-۳-۲ روش پخش ماسه

روش پخش ماسه^۱ یکی از آزمایشهای مرسوم اندازه‌گیری بافت درشت در دنیا می‌باشد. این آزمایش در کشورهای زیادی بصورت استاندارد درآمده و در آمریکا مطابق دستور العمل ASTM E965 می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر نوع دانه بندی و اندازه اسمی سنگدانه‌ها در بافت درشت و همچنین به منظور بررسی تاثیر میزان قیر بر بافت درشت نمونه‌های چپ‌سیل در دو نوع دانه بندی ج و د بر روی نمونه‌های اساس سیمانی اجرا شدند [ASTM E965, 2015]. نمونه‌ها در درصد قیر بهینه و درصدهای ± 10 نسبت به قیر بهینه ساخته شدند که نتایج آن در قسمت نتایج آورده شده است. لازم به ذکر است که وزن مخصوص ماسه استفاده شده در این آزمایش ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب بوده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج آزمایش جاروب سطحی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد این آزمایش به منظور ارزیابی میزان کنده شدن سنگدانه‌ها انجام می‌شود. در این آزمایش نمونه‌ها تحت آزمایش جاروب به مدت ۶۰ ثانیه قرار گرفتند.

برای ساخت و اجرای چپ‌سیل بر روی اساس سیمانی از روابط ارائه شده در نشریه استفاده شد. در این روش برای تعیین میزان سنگدانه و قیر مورد نیاز، دانه‌بندی را به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض بر این است که ۷۰ درصد بعد سنگدانه‌ها در داخل قیر فرو خواهد رفت. اطلاعات مورد نیاز در مورد سنگدانه‌ها عبارت است از: حداقل متوسط ابعاد سنگدانه، وزن مخصوص، فضای خالی سنگدانه‌ها در شرایط غیر متراکم و تمیزی مصالح. اطلاعات لازم در مورد تعیین مقدار قیر مورد نیاز عبارت است از: مقدار قیر بجا مانده پس از تصعید، بافت بستر و ترافیک میانگین کمترین بعد سنگدانه [Shuler, 2011].

مهمترین مزایای استفاده از آزمایش جاروب^۲، شبیه سازی عملکرد قیر امولسیون و سنگدانه با جاروب سطح نمونه، تقسیم بندی و قابل اجراء بودن قیرهای امولسیون زودشکن بر روی راههایی که نیاز به بازگشایی سریع ترافیک دارند و همچنین به قصد ارزیابی مشخصات ترکیب قیر و سنگدانه برای اطمینان از مناسب بودن ترمیم سطح قبل از بازگشایی مسیر به روی ترافیک است. این آزمایش علاوه بر سریع بودن آن، ارزان نیز هست. در این آزمایش میتوان یکی از پارامترهای موثر در عملکرد چپ‌سیل را به عنوان متغیر در نظر گرفت و در نتیجه بین نمونه‌های ساخته شده یک مقایسه کلی انجام داد. این مقایسه یک دید کلی را قبل از انجام آزمایشهای پرهزینه و وقت گیرتر خواهد داد [Wasiuddin, Marshall and Saltibu, 2013; Johannes, 2011]. این دستگاه مطابق با مشخصات فنی ارائه شده در استاندارد ASTM D 7000-04 می‌باشد. شکل ۳ تصویری از دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه را نشان می‌دهد. در این آزمایش نمونه‌های ساخته شده توسط برس تحت سایش قرار می‌گیرند و میزان کنده‌شدن سنگدانه‌ها بررسی می‌شود.

در جدول ۱۱ مقدار قیر بهینه برای انجام آزمایش جاروب با توجه به جدول‌های ۹ و ۱۰، برای حالت‌های مختلف آورده شده است. در این جدول میزان تاثیر نوع سطح و نوع قیر در میزان کنده شدن سنگدانه‌ها نشان داده شده است.

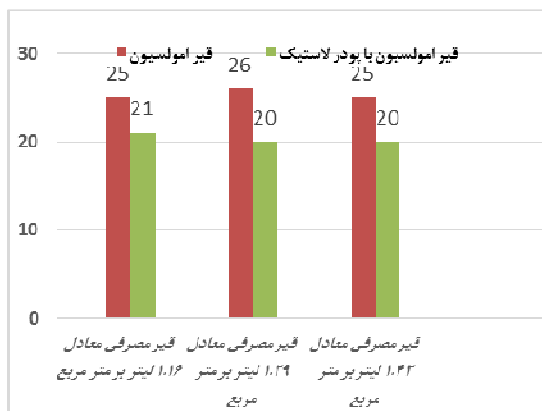
جدول ۱۱. مقدار قیر بهینه برای انجام آزمایش جاروب

مقدار قیر بهینه مورد نیاز برای هر نمونه (Lit)			نوع دانه‌بندی
درصد افزایش	درصد	CMS-2h با ۵	
			CRS-1
			پودر لاستیک
۲۳	۰/۰۷	۰/۰۶۴	ج
۲۱	۰/۰۵۶	۰/۰۵۱	د

در این آزمایش سرعت دستگاه آزمایش جاروب معادل ۰/۸۳ دور در ثانیه تنظیم گردید. نتایج بدست آمده تحت آزمایش جاروب بر روی نمونه‌های اجرا شده بر روی اساس تثبیت شده با سیمان در جدول ۹ و ۱۰ و نمودار شکل ۴ و نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. در رابطه با میزان قیر مصرفی در جدول، برای دانه بندی نوع (ج) مقدار $1/29 \text{ lit/m}^2$ و برای دانه بندی نوع (د) مقدار $1/02 \text{ lit/m}^2$ محاسبه شد. با توجه به اینکه سطح چپ‌سیل اجرا شده بر روی نمونه‌های اساس تثبیت شده با سیمان برابر با $0/05 \text{ m}^2$ است، در نتیجه برای ساخت نمونه‌های چپ‌سیل، $0/064 \text{ lit}$ برای دانه بندی نوع (ج) و $0/051 \text{ lit}$ برای دانه بندی نوع (د) استفاده شد. برای بررسی تاثیر درصد قیر مقادیر فوق به اندازه ۱۰ درصد کاهش و افزایش می‌یابد.

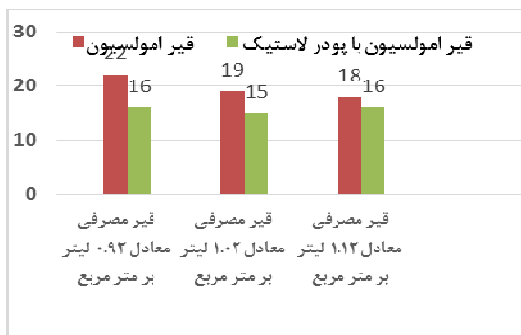
جدول ۹. دانه‌بندی نوع ج بر روی نمونه اساس تثبیت شده با

سیمان		
میزان قیر مصرفی برای هر نمونه (Lit)	درصد کنده شدن سنگدانه (قیر امولسیون با پودر لاستیک)	درصد کنده شدن سنگدانه (قیر امولسیون)
۰/۰۵۸	۲۱	۲۵
۰/۰۶۴	۲۰	۲۶
۰/۰۷۰	۲۰	۲۵



شکل ۴. درصد کنده شدن سنگدانه نوع ج بر روی اساس تثبیت

شده با سیمان با دو نوع قیر امولسیون و امولسیون با پودر لاستیک



شکل ۵. درصد کنده شدن سنگدانه نوع د بر روی اساس تثبیت

شده با سیمان با دو نوع قیر امولسیون و امولسیون با پودر لاستیک

جدول ۱۰. دانه‌بندی نوع د بر روی اساس تثبیت شده با سیمان		
میزان قیر مصرفی برای هر نمونه (Lit)	درصد کنده شدن سنگدانه (قیر امولسیون با پودر لاستیک)	درصد کنده شدن سنگدانه (قیر امولسیون)
۰/۰۴۶	۱۶	۲۲
۰/۰۵۱	۱۵	۱۹
۰/۰۵۶	۱۶	۱۸



شکل ۶. (الف) نمایش تخلخل کم موجود در سطح نمونه‌ی

اساس تثبیت شده سیمانی و (ب) پخش ماسه بر روی چپ‌سیل

برای ضریب اصطکاک جاده استانداردهای مختلفی وجود دارد که با توجه به شرایط همچون سرعت، نوع جاده، شرایط آب و هوایی و غیره تغییر می‌کند. در این میان، در استاندارد وزارت راه کشور فرانسه دو پارامتر حداقل ضریب صیقلی سنگ و عمق زبری رویه راه مورد توجه قرار گرفته و حداقل مقادیری برای این دو پیشنهاد شده است. حداقل مقادیر برای عمق زبری بر اساس استاندارد وزارت راه فرانسه عبارت است از:

- حداقل عمق زبری رویه راه در هر شرایطی 0.2 ملیتر
- حداقل عمق بین 0.2 تا 0.4 میلیتر در نواحی شهری و سرعت 80 کیلومتر در ساعت
- حداقل عمق بین 0.4 تا 0.8 میلیتر برای جاده‌های با سرعت 80 تا 120 کیلومتر در ساعت
- حداقل عمق بین 0.8 تا 1.2 میلیتر برای جاده‌های با سرعت بیش از 120 کیلومتر در ساعت [Ueckermann, et al., 2015].

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش پخش ماسه در جدول (۱۱)، هر دو نوع دانه بندی حداقل عمق زبری مورد نیاز را تامین می‌کنند. همان طور که از جدول ۱۲ مشخص است با افزایش مقدار قیر مصرفی، عمق بافت درشت کاهش می‌یابد، این نتیجه در مقایسه با سایر تحقیقات نیز مورد تأیید است، دلیل کاهش عمق این است که با افزایش قیر مصرفی عمق بیشتری از سنگدانه در داخل قیر

همان طور که از جدول‌های (۸) و (۹) مشخص است، استفاده قیر امولسیون با پودر لاستیک^۹ باعث کاهش ۱۷ الی ۲۵ درصد کنده شدن سنگدانه‌ها شده است. استفاده از قیر امولسیون با درصد بهینه یا بیشتر از آن باعث کاهش کنده شدن سنگدانه می‌شود. دلیل این موضوع در این است که با افزایش قیر مصرفی عمق بیشتری از سنگدانه در داخل قیر قرار می‌گیرد در نتیجه باعث افزایش نیروی لازم برای جدا شدن سنگدانه می‌شود.

انجام آزمایش جاروب بر روی نمونه‌ها نشان داد که عملکرد دانه بندی نوع (د) بهتر از دانه بندی نوع (ج) است و باعث کاهش کنده شدن سنگدانه به مقدار ۵ الی ۲۰ درصد شده است. سطح نمونه‌های اساس تثبیت شده با سیمان یک سطح صاف و صیقلی می‌باشد و در نتیجه باعث کاهش عمق بافت می‌شود. با کاهش عمق بافت میزان درگیری بافت درشت نسبت به بافت ریز کاهش می‌یابد. در نتیجه با ریزتر شدن سنگدانه میزان درگیری بین سطح موجود و سنگدانه افزایش می‌یابد. در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که میزان تخلخل در سطح اساس سیمانی زیاد است در نتیجه مقدار نفوذ قیر در داخل اساس سیمانی مناسب است. در مقیاس میدانی نیز کنده شدن سنگدانه‌ها بر روی انواع اساس سخت بررسی گردید که نتایج فوق را تأیید نمودند.

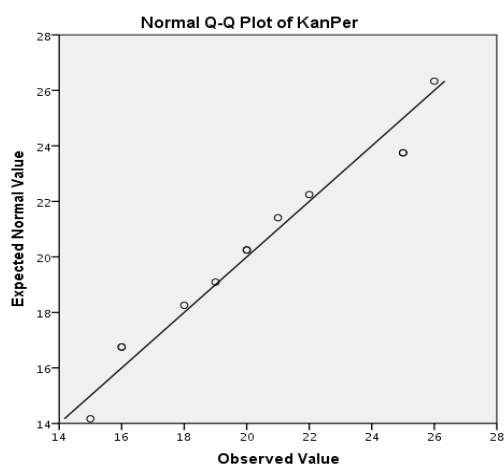
۳-۳- بررسی نتایج آزمایش روش پخش ماسه

به منظور بررسی تأثیر نوع دانه بندی و اندازه اسمی سنگدانه‌ها در بافت درشت و همچنین به منظور بررسی تأثیر میزان قیر بر بافت درشت نمونه‌های چپ‌سیل در دو نوع دانه‌بندی ج و د بر روی نمونه‌های اساس سیمانی اجرا شدند. نمونه‌ها در درصد قیر بهینه و درصد‌های ± 10 نسبت به قیر بهینه ساخته شدند که نتایج آن در جدول ۱۲ آورده شده است. قابل ذکر است که وزن مخصوص ماسه استفاده شده در این آزمایش 1.2 گرم بر سانتی متر مکعب بوده است. تصاویر انجام آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

است. استفاده از چپ سیل در هر دو نوع دانه بندی باعث افزایش عمق بافت در اساس تثبیت شده با سیمان شده است.

۳-۳ تحلیل آماری نتایج

به علت محدودیت تعداد خروجی نتایج آزمایشگاهی، تعیین نرمال بودن نتایج حاصل از فرآیند آزمایشگاهی یکی از موارد ضروری از تحقیقات است؛ لذا آزمون ترسیمی برای این هدف مناسب است، همانگونه که در شکل ۷، ملاحظه می شود، تفاوتی بین مقادیر مشاهده و نرمال به صورت گرافیکی وجود ندارد.



شکل ۷. رسم نمودار بررسی نرمال بودن داده ها برای متغیر میانگین کنده شدن سنگدانه ها

جهت بررسی اثرگذاری متغیرهای دانه بندی بر عمق بافت سطحی و نیز اثرگذاری نوع قیر بر میزان کنده شدن سنگدانه ها با توجه به نرمال بودن داده ها آزمون آماری انجام گرفت که در هر دو آزمون p -Value از ۰/۰۵۰ کمتر و فرض تاثیرگذاری این دو متغیر بر روی هم به ترتیب اشاره شده همانگونه که در جدول (۱۳) نشان می دهد، خروجی نرم افزار آماری، در سطح معناداری ۹۵ درصد تأیید گردید.

فرو می رود، در نتیجه عمق بافت درشت کاهش می یابد [Santos and Júlio, 2013]

جدول ۱۲. تاثیر نوع دانه بندی و درصد قیر در عمق بافت

درشت

نوع رویه	قیر مصرفی	قطر میانگین	حجم ماسه	عمق بافت
	(Lit/m ²)	(cm)	(cm ³)	(mm)
چپ سیل	۱/۱۶	۱۴/۷۵	۱۶/۶۷	۰/۹۷
با دانه بندی (ج)	۱/۲۹	۱۴/۹	۱۶/۶۷	۰/۹۵
چپ سیل	۰/۹۲	۱۵/۷۲	۱۶/۶۷	۰/۹۴
با دانه بندی (د)	۱/۰۲	۱۵/۸	۱۶/۶۷	۰/۸۵
اساس	-	۱۵/۹۶	۱۶/۶۷	۰/۸۲
سیمانی (بدون چپ سیل)	-	۱۵/۹۶	۱۰	۰/۵

نکته دیگری که از جدول ۱۲ برداشت می شود این است که عمق بافت درشت با تغییر دانه بندی از نوع (ج) به نوع (د) به مقدار تقریبی ۱۱ درصد کاهش می یابد. دلیل این است که در دانه بندی نوع (ج) حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ و در دانه بندی نوع (د) حداکثر اندازه اسمی برابر (۵/۶) میلیمتر است. همچنین همانطور که از جدول (۳) در قسمت قبل مشخص است، در دانه بندی نوع (ج) ۰ تا ۲۵ درصد سنگدانه از الک ۵/۶ میلیمتر عبور کرده اند ولی در دانه بندی نوع (د) ۸۵ تا ۱۰۰ درصد سنگدانه از الک ۵/۶ میلیمتر عبور کرده

جدول ۱۳. خروجی نرم افزار آماری، در سطح معناداری

۹۵ درصد

Correlations			
	OmgBaf	DanBan	
Pearson Correlation	1	-.980**	
OmgBaf Sig. (2-tailed)		.000	
N	12	12	
Pearson Correlation	-.980**	1	
DanBan Sig. (2-tailed)	.000		
N	12	12	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Correlations			
	KanPer	TyBit	
Pearson Correlation	1	-.632*	
KanPer Sig. (2-tailed)		.028	
N	12	12	
Pearson Correlation	-.632*	1	
TyBit Sig. (2-tailed)	.028		
N	12	12	

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

سنگدانه نیز افزایش می‌یابد. البته ناگفته نماند که استفاده از قیر بیش از حد خطر قیرزدگی را افزایش می‌دهد.

با افزایش قیر مصرفی میزان عمق بافت در چپ‌سیل به مقدار ۲ درصد کاهش می‌یابد. با ریز تر شدن دانه بندی (تبدیل دانه‌بندی ج به دانه بندی د) میزان عمق بافت در چپ‌سیل به مقدار تقریبی ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. دلیل این عامل این است که در دانه بندی نوع (ج) حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ و در دانه بندی نوع (د) حداکثر اندازه اسمی برابر (۵/۶) میلیمتر است.

بررسی عملکرد چپ‌سیل با دانه‌بندی ریزتر در محل قوس‌های افقی و تقاطع‌های شهری، بررسی استفاده از الیاف در کاهش میزان کنده‌شدن سنگدانه‌ها از جمله موضوعاتی هست، که در ادامه این مطالعات می‌تواند مورد توجه قرارگیرد. همچنین متغیرهایی نظیر دمای محیط، شیوه اجراء شرایط عمل‌آوری می‌تواند به صورت مطالعات میدانی در تحقیقات آتی انجام شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1. Chip seal
2. Bituminous emulsion surface
3. Low volume traffic road
4. Cement treatment base (CTB)
5. Raveling resistance
6. Wyoming State
7. Sweep test
8. Sand patch macro texture
9. Waste rubber powder emulsion
10. Surface performance

۶- مراجع

- Adams, J., Castorena, C., Im, J. H., Ilias, M., & Kim, Y. R. (2017), "Addressing raveling resistance in chip seal specifications. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board", (2612), pp.39-46.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد سطحی^{۱۱} چپ‌سیل با استفاده از دو نوع دانه‌بندی و سه درصد قیر و دو نوع قیر بررسی گردید که نتایج پژوهش به شرح زیر است:

با افزودن پودر لاستیک میزان کنده شدن سنگدانه در چپ‌سیل کاهش می‌یابد. این میزان به مقدار ۲۳ درصد برای دانه‌بندی نوع (ج) و ۲۰ درصد برای دانه بندی نوع (د) می‌باشد.

با ریزتر شدن دانه بندی میزان کنده شدن سنگدانه‌ها تقریباً ۱۴ درصد کاهش یافت. دلیل این موضوع در این است که با توجه به صیقلی بودن سطح اساس تثبیت شده با سیمان، هرچه قدر دانه بندی ریزتر باشد میزان قفل و بست بین دانه‌بندی و رویه موجود بهتر انجام می‌شود. همچنین در دانه‌بندی ریزتر به دلیل قرار گرفتن تعداد سنگدانه بیشتر در واحد سطح نیرویی که به یک سنگدانه وارد میشود در دانه‌بندی ریزتر کاهش می‌یابد.

استفاده از قیر با درصد بهینه یا بیشتر از آن باعث کاهش میزان کنده شدن سنگدانه‌ها می‌شود. دلیل این موضوع در این است که با افزایش قیر مصرفی حجم بیشتری از سنگدانه در داخل قیر فرو می‌رود در نتیجه نیروی لازم برای کنده

- aggregate gradation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.2235, pp.95-102.
- Hicks, R., Moulthrop, J., & Daleiden, J. (1999). "Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1680, pp.1-12.
 - Huang, W., Lin, P., Tang, N., Hu, J., & Xiao, F. (2017). "Effect of crumb rubber degradation on components distribution and rheological properties of terminal blend rubberized asphalt binder". *Construction and Building Materials*, 151, pp.897-906.
 - Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234, (2011), "Asphalt Institute of Iran and Office of Deputy for Strategic Supervision", Tehran, pp. 1-352, (in Persian).
 - Khabiri, M. M. (2016), "The application of factor analysis to determine the parameters of planning work-zone in the road repair and maintenance". *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, Vol.7, No.1, pp. pp.1-10.
 - Khabiri, M. M., Khishdari, A., & Gheibi, E. (2017), "Effect of tyre powder penetration on stress and stability of the road embankments". *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), pp. 966-979.
 - Lim, S., & Zollinger, D. (2003), "Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1837), pp.30-38.
 - Mihyeon Jeon, C., & Amekudzi, A. (2005), "Addressing sustainability in transportation systems: definitions, indicators, and metrics".
 - ASTM C150-07, (2007), "Standard Specification for Portland Cement," *Annul. B. ASTM Standars*, vol. 552, ASTM C150 / C150M-19a, Standard Specification for Portland cement, ASTM International, West Conshohocken.
 - ASTM D7000-04, (2004), "Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples", ASTM International, West Conshohocken, PA.
 - ASTM E965-15, (2015), "Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique", ASTM International, West Conshohocken, PA.
 - ASTM D1557-12e1, (2012), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))", ASTM International, West Conshohocken, PA.
 - A. Ueckermann, D. Wang, M. Oeser, and B. Steinauer, (2015), "Calculation of skid resistance from texture measurements," *J. Traffic Transp. Eng. English Ed.*, vol. 2, No. 1, pp. 3–16.
 - Gransberg, D. D., & James, D. M. (2005), "Chip seal best practices", Vol. 342, *Transportation Research Board*.
 - Guthrie, W., & Rogers, M. (2010). "Variability in construction of cement-treated base layers: material properties and contractor performance". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2186, pp.78-89.
 - Johannes, P., Mahmoud, E., & Bahia, H. (2011). Sensitivity of ASTM D7000 Sweep test to emulsion application rate and

- Tabatabaai, N., Kamali Abianah, Z., (2004), "Investigating the behavior of bitumen modified VB with powdered rubber", 2nd Iranian Bitumen and Asphalt Conference, Tehran, Iran Bitumen and Asphalt Institute, Faculty of Engineering, Tehran University pp.1-13(in Persian).
- Taerian, A, Abtahi, M. & Hejazi, B., (2014), "Mechanical investigation of the effect of the application of rubber particles in bitumen", Transportation Engineering Journal, Vol.6, No.3, pp.479-492(in Persian).
- Tufuor, E. O., Rilett, L. R., & TenHulzen, P., (2017), "In-vehicle evaluation of milled rumble strips in pre-and post-chip seal maintenance periods". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2612, pp. 47-59.
- Wasiuddin, N. M., Marshall, A., Saltibus, N. E., Saber, A., Abadie, C., & Mohammad, L. N., (2013), "Use of sweep test for emulsion and hot asphalt chip seals: Laboratory and field evaluation. Journal of Testing and Evaluation", Vol. 41, No.2, pp. 289-298.
- Wilson, B., & Guthrie, W., (2011), "Strength and deformation characteristics of cement-treated reclaimed pavement with a chip seal". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2212, pp. 100-109.
- Journal of infrastructure systems, Vol.11, No.1, pp.31-50.
- Mohd Rasdan Ibrahim, Herda Yati Katman, Mohamed Rehan Karim, Suhana Koting, and Nuha S. Mashaan, (2013), "A review on the effect of crumb rubber addition to the rheology of crumb rubber modified bitumen," Advances in Materials Science and Engineering, Vol. Article ID 415246, pp.1-8.
- Navarro, P. Partal, F. J. Martínez-Boza, and C. Gallegos, "Influence of processing conditions on the rheological behavior of crumb tire rubber-modified bitumen," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 104, No. 3, pp. 1683–1691, 2007.
- Okunade, E. A., (2010), "Geotechnical properties of some coal fly ash stabilized Southwestern Nigeria lateritic soils". Modern Applied Science, Vol.4, No.12, pp.1-66.
- Raad, L., Weichert, D., & Najm, W., (1988), "Stability of multilayer systems under repeated loads". Transportation Research Record, No.1207.
- Santos, P. M., & Júlio, E. N., (2013), "A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces". Construction and Building Materials, No.38, pp. 912-923.
- Shuler, S., (2011), "Manual for emulsion-based chip seals for pavement preservation (Vol. 680)". Transportation Research Board.