Archive of SID

بررسی تأثیر دانه‌بندی و ایجاد بافت درشت به روش پخش سنگریزه بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی راه

منصور فخری*[۱] و میلاد طاری‌بخش [۲]

[۱] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

ایجاد مقاومت لغزندگی کافی یکی از الزامات مهم و اجتناب‌ناپذیر در ساخت روسازی‌های بتنی است. انتخاب روش پرداخت سطح رویه، فاکتوری است که اثرات عمده‌ای بر خصوصیات اصطکاکی سطح سواره‌رو دارد. با این حال، هنوز دستورالعمل جامعی برای شناسایی و انتخاب روش ایجاد بافت روسازی‌های بتنی که مجموعه عوامل فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و ایمنی راه را در بر گیرد، وجود ندارد. هدف از این پژوهش آزمایشگاهی، تعیین رابطه بین مشخصات بافت درشت ایجاد شده و مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی می‌باشد. برای این منظور با در نظر گرفتن سه تیپ دانه‌بندی مختلف بر اساس تفاوت در بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌های آن‌ها، به ارائه سه طرح اختلاط مناسب اقدام شد. پس از پذیرش این سه تیپ مخلوط، جهت ساخت نمونه‌های مربوط به آزمایش‌های پاندول انگلیسی و پخش ماسه، روش پخش سنگریزه در وضعیت بتن پلاستیک به کار گرفته شد تا میزان تأثیر این روش بر خصوصیات بافت ریز و بافت درشت رویه‌های بتنی، ارزیابی گردد. سنگ‌دانه‌ها در دو نوع و دو قطر متفاوت (به صورت تک اندازه) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج به دست آمده حاکی از آن هستند که ایجاد بافت درشت بر روی سطح بتن، مقاومت لغزندگی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین در ارتباط با روش پخش سنگ‌دانه، نوع و دانه‌بندی مصالح مورد استفاده برای ایجاد بافت، تعیین کننده میزان مقاومت لغزندگی خواهند بود.

واژگان کلیدی: مقاومت لغزندگی، روسازی بتنی، پخش سنگدانه، آونگ انگلیسی، پخش ماسه.

۱- مقدمه

روسازی راه‌ها به طور عمده به دو صورت آسفالتی و بتنی وجود دارند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. با توجه به مشکلات روسازی‌های آسفالتی در محورهای سنگین، که اغلب دارای ناهمواری، موج‌های بلند و بعضاً شکستگی می‌باشند، کاربرد دال بتنی به عنوان یک رویه مقاوم و با دوام باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات می‌گردد. بنابراین، تمایل مهندسان و سیاستگزاران امر راه‌سازی، به استفاده از روسازی‌های بتنی در سرتاسر جهان رو به افزایش است [۱].

مقاومت لغزندگی یکی از مهمترین مباحث ایمنی مسیر است که امروزه دارای جایگاه ویژه‌ای در مطالعات طراحی و ملاحظات فنی و اقتصادی می‌باشد. مقاومت لغزندگی با ضریب اصطکاک بین لاستیک و رویه راه بیان می‌شود و با استفاده از دستگاه‌های مختلفی در آزمایشگاه و یا سطح جاده اندازه‌گیری می‌شود. عدم مقاومت اصطکاکی کافی در سطح روسازی نه تنها خود یکی از علل عمده تصادفات است، بلکه سایر عوامل مؤثر در تصادفات جاده‌ای را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲].

در صورت فقدان مقدار مناسبی از اصطکاک در شرایط آب و هوایی بارانی، احتمال وقوع تصادف ناشی از سرخوردن وسیله نقلیه بر روی سطح روسازی بالا می‌باشد. آمارهای جمع‌آوری شده نشان می‌دهند که تلفات انسانی، بدترین پیامد هر تصادف است. متأسفانه آمار متوفیان ناشی از تصادفات در ایران بسیار زیاد بوده و به طور میانگین در سال ۱۳۸۸ روزانه بیش از ۶۳ نفر در اثر تصادفات جاده‌ای کشته شدند. این در حالی است که در کشورهای اروپای غربی مانند آلمان، انگلیس و فرانسه که حتی پارامتر وسیله نقلیه-کیلومتر طی شده در آن کشورها بیش از ۱۰ برابر ایران می‌باشد، تعداد کشته‌ها بسیار کمتر است [۳]. بنابراین ارائه راهکارهایی جهت بهبود اصطکاک سطحی و به تبع، افزایش ایمنی مسیر یکی از مسائل ضروری به نظر می‌رسد.

در این پژوهش، سعی بر آن است تا با یافتن ارتباط بین چگونگی ایجاد بافت درشت و میزان مقاومت در برابر لغزش، گامی سودمند در جهت ارتقاء سطح ایمنی راه‌های بتنی برداشته شود؛ که در این راستا ارزیابی روش پخش سنگ‌دانه بر روی بتن تازه مدنظر قرار گرفته است. همچنین با توجه به اثر ابعاد

* نویسنده مسئول
دریافت ۹۱/۲/۲ پذیرش ۹۱/۱۰/۱۶
www.SID.ir

Archive of SID

سنگ‌دانه‌های به کار رفته در مخلوط بتنی بر مقاومت لغزشی سطح راه، انواع مختلف دانه‌بندی‌ها برای دستیابی به بالاترین میزان اصطکاک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲- مروری بر پیشینه تحقیق

ایجاد مقاومت لغزندگی کافی یکی از الزامات اجتناب‌ناپذیر و مهم در ساخت روسازی‌های بتنی است و از رویه‌های بتنی بدون بافت درشت، فقط می‌توان در مکان‌هایی که مسأله لغزش، اهمیت خاصی ندارد، مانند پارکینگ‌ها، کف کارگاه‌ها و کارخانه‌ها و همچنین در انبارها استفاده نمود [۴]. روش‌ها و تجهیزات متنوع و مختلفی برای ایجاد بافت در روسازی‌های بتنی توسعه یافته‌اند، که اغلب آن‌ها بلافاصله پس از بتن‌ریزی و وقتی که سطح بتن هنوز سفت نشده است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقابل، برخی دیگر از دستگاه‌ها، برای ایجاد بافت پس از سخت شدن بتن به کار می‌روند، که ضمناً یکی از کاربردهای آن‌ها، احیاء بافت درشت روسازی‌های موجود می‌باشد. انتخاب روش پرداخت سطح رویه و نحوه ایجاد بافت درشت بر روی سطح راه، فاکتوری است که اثرات عمده‌ای بر ویژگی‌های اصطکاکی سطح رویه دارد [۵]. با این وجود، دستورالعمل جامعی برای شناسایی و انتخاب روش ایجاد بافت روسازی‌های بتنی که مجموعه عوامل فنی، زیست محیطی، اقتصادی و ایمنی راه را دربر گیرد، موجود یا در دسترس نیست [۶].

مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی تحت تأثیر عواملی از قبیل نوع سنگ‌دانه‌ها، شکل و اندازه و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، نسبت آب به سیمان، درصد فضای خالی، روش عمل‌آوری و مهمتر از همه؛ روش ایجاد بافت درشت بر روی سطح رویه قرار دارد [۵]. عمق، فاصله و جهت‌گیری بافت درشت سطحی می‌تواند اثر قابل توجهی بر خصوصیات اصطکاکی، خصوصیات مربوط به آلایندگی صوتی و کیفیت سواری داشته باشد [۷].

به طور کلی ایجاد بافت درشت بر روی روسازی بتنی، از طرق مختلف می‌تواند صورت پذیرد که در این میان، روش پخش سنگدانه بر روی بتن در حال گیرش (بتن پلاستیک) یکی از معمول‌ترین روش‌ها بخصوص در کشورهای اروپایی است. در این روش پس از بتن‌ریزی و ویبره و تسطیح بتن، مقدار معینی سنگ‌دانه با مقاومت صیقل پذیری بالا بر روی سطح رویه پخش می‌گردد. قسمت تحتانی هر یک از سنگ‌دانه‌ها درون بتن فرو می‌رود و قسمت فوقانی آن‌ها به صورت برجستگی‌هایی بر روی سطح رویه ظاهر می‌شود. نتیجه این کار ایجاد بافت درشت و افزایش مقاومت لغزشی می‌باشد. قابل ذکر است که برخی از سنگ‌دانه‌ها در اثر عبور ترافیک در روزهای اولیه، از سطح جدا می‌شوند که بایستی از روی مسیر جمع‌آوری شوند تا ایجاد خطر ننمایند [۸]. همچنین با توجه به این که در حین تراشیدن و ترمیم روسازی‌های آسفالتی، مقدار زیادی مصالح خرده آسفالتی به صورت ضایعات باقی می‌ماند، می‌توان از آن‌ها برای افزایش مقاومت لغزشی روسازی‌های بتنی بهره برد.

در این پژوهش با به کارگیری دو نوع مختلف و دو اندازه متفاوت سنگ‌دانه، بهترین وضعیت ایجاد بافت به روش پخش سنگ‌دانه مشخص خواهد شد. ذکر این مطلب ضروری است که در ضمن بهینه‌یابی نوع و قطر سنگدانه‌ها، باید به مسائلی چون آلایندگی صوتی و کیفیت سواری نیز توجه نمود. در واقع بهترین وضعیت ایجاد بافت درشت هنگامی محقق خواهد شد که مقاومت لغزندگی سطح رویه و آلودگی صوتی محیط پیرامون و کیفیت سواری وسیله نقلیه، به طور همزمان در حد قابل قبول باشند و هیچ یک از این سه مورد، دچار نقصان نباشند.

۳- طرح اختلاط بتن و برنامه آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه‌های بتنی مورد نیاز، از سیمان پرتلند تیپ دو محصول کارخانه سیمان تهران و آب شرب شهری و همچنین شن کوهی شکسته و ماسه رودخانه‌ای گرد گوشه، که از معادن شرق استان تهران (پاکدشت) تهیه شدند و عمدتاً حاوی کانی‌های سیلیسی می‌باشند، استفاده شد [۹]. سنگ‌دانه‌هایی که در مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بایستی در برابر وزن وسایل نقلیه سنگین، مقاومت کافی داشته باشند و نباید در اثر تنش‌های ناشی از وزن آن‌ها شکسته و خرد شوند. سختی مصالح سنگی با انجام آزمایش سایش لس‌آنجلس مطابق استاندارد ASTM C131 ارزیابی می‌شود که در این تحقیق از چرخش ۵۰۰ دور در دقیقه دستگاه و دانه‌بندی B استاندارد استفاده گشته است. آزمایش دیگری که بر روی مصالح سنگی انجام گرفت، درصد شکستگی مصالح براساس استاندارد ASTM D5821 می‌باشد. این آزمایش با هدف ماکزیمم کردن مقاومت برشی به کمک افزایش اصطکاک بین ذرات و همچنین با هدف تأمین استحکام لازم برای انجام بهسازی سطحی سنگ‌دانه‌ها و افزایش مقاومت اصطکاکی سنگ‌دانه‌های به کار رفته در لایه رویه روسازی، انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش‌های فوق در جدول (۱) آورده شده‌اند. طبق توصیه نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور تحت عنوان مشخصات فنی عمومی راه (سال ۱۳۸۲)، درصد سایش سنگ‌دانه‌های درشت بتن، نباید از ۴۰ درصد تجاوز نماید.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- نتایج آزمایش سایش لس‌آنجلس و درصد شکستگی

آزمایشات سنگ‌دانه‌ها	نتایج (درصد)
افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس	۱۶
درصد شکستگی در یک جبهه مصالح روی الک شماره ۴	۹۸
درصد شکستگی در دو جبهه مصالح روی الک شماره ۴	۹۳

در این پژوهش برای تهیه مخلوط‌های بتنی مورد نیاز، از حد وسط دانه‌بندی‌های شماره ۶، ۷ و ۸۹ استاندارد ASTM C33 استفاده گشته است. تفاوت اصلی این سه تیپ دانه‌بندی مختلف، ناشی از تفاوت در حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌های (NMSA) آن‌ها می‌باشد. بدین ترتیب که دانه‌بندی شماره ۶ دارای حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه برابر با ۱۹ میلی‌متر، دانه‌بندی شماره ۷ دارای حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه برابر با ۱۲/۵ میلی‌متر و سرانجام، دانه‌بندی شماره ۸۹ دارای حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه برابر با ۹/۵ میلی‌متر می‌باشند. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش، بررسی اثر اندازه سنگ‌دانه‌ها بر شاخص‌های لغزندگی خواهد بود. جدول (۲) دانه‌بندی‌های انتخاب شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد.

وزن مخصوص مصالح سنگی اثر قابل ملاحظه‌ای در فضای خالی مخلوط بتنی دارد که علت آن تخلخل سنگ‌دانه‌ها و جذب خمیر سیمان توسط آن‌ها می‌باشد. جهت لحاظ نمودن اثر تخلخل یا خلل و فرج سنگ‌دانه‌ها، وزن مخصوص مصالح سنگی به صورت‌های مختلف اعم از وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و همچنین وزن مخصوص ظاهری خشک و میله خورده شن تعریف شده و محاسبه می‌گردند. در طرح اختلاط بتن همیشه فرض بر این است که دانه‌ها در وضعیت اشباع با سطح خشک قرار دارند. بنابراین از وزن مخصوص حقیقی SSD در طراحی استفاده خواهد شد. در جدول (۳) مقادیر مربوط به اوزان مخصوص مصالح سنگی و سیمان مورد استفاده در تحقیق حاضر به همراه استانداردهای آزمایش‌ها آورده شده است.

در این تحقیق، مقاومت فشاری مشخصه برای هر سه تیپ طرح اختلاط، برابر با ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد و در نتیجه، نسبت آب به سیمان ثابت و برابر ۰/۴۲ به دست می‌آید. این کار باعث می‌شود تا تنها تفاوت سه تیپ مخلوط بتنی مذکور، در حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌های آن‌ها باشد و بدین ترتیب، بدون تغییر سایر پارامترهای طرح اختلاط، بتوان تأثیر اندازه سنگ‌دانه‌ها بر شاخص‌های لغزندگی را مقایسه نمود.

جدول ۲- حدود دانه‌بندی شن و ماسه انتخاب شده برای این تحقیق

اندازه الک (mm)	دانه‌بندی تیپ A			دانه‌بندی تیپ B			دانه‌بندی تیپ C		
	شن	ماسه	ترکیبی	شن	ماسه	ترکیبی	شن	ماسه	ترکیبی
۲۵/۴	۱۰۰		۱۰۰						
۱۹	۹۵		۹۷/۱	۱۰۰		۱۰۰			
۱۲/۵	۴۰		۶۵/۴	۹۵		۹۷/۲	۱۰۰		۱۰۰
۹/۵	۱۰		۴۸/۱	۵۵		۷۵/۲	۹۵		۹۷/۴
۴/۷۵	۰	۱۰۰	۴۲/۳	۱۰	۱۰۰	۵۰/۴	۳۵	۱۰۰	۶۶/۰
۲/۳۶		۸۵	۳۵/۹	۰	۹۰	۴۰/۴	۱۵	۹۵	۵۳/۲
۱/۱۸		۶۵	۲۷/۴		۷۰	۳۱/۴	۰	۷۵	۳۶/۸
۰/۶		۴۰	۱۶/۸		۴۵	۲۰/۲		۵۰	۲۴/۹
۰/۳		۱۵	۶/۲		۱۵	۶/۷		۲۰	۱۰/۶
۰/۱۵		۰	۰		۰	۰		۵	۳/۴
۰/۰۷۵								۰	۰
مدول نرمی ماسه		۲/۹۵			۲/۸۰			۲/۵۵	

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- وزن مخصوص مصالح سنگی و سیمان مورد استفاده در این تحقیق

روش آزمایش	دانه‌بندی تیپ C	دانه‌بندی تیپ B	دانه‌بندی تیپ A	نوع مصالح	
ASTM C127	۲/۶۲۲	۲/۶۳۱	۲/۶۳۶	شن	وزن مخصوص حقیقی در وضعیت اشباع با سطح خشک (S_s)
ASTM C128	۲/۵۱۰	۲/۵۱۷	۲/۵۳۰	ماسه	
ASTM C127	۱/۶۱	۱/۴۵	۱/۳۹	شن	درصد جذب آب (%A)
ASTM C128	۲/۳۰	۲/۲۶	۲/۱۶	ماسه	
ASTM C29	۱۶۴۶	۱۵۸۵	۱۵۶۷	شن	وزن مخصوص ظاهری خشک میله خورده (Kg/m^3)
ASTM C188	۳/۱۰۷	۳/۱۰۷	۳/۱۰۷	سیمان	وزن مخصوص سیمان

برای تعیین نسبت‌های اختلاط اجزاء مخلوط بتنی، با در نظر گرفتن اسلامپ ۵۰ میلیمتر برای بتن، مراحل گام به گام بر اساس ACI 211-1 پیموده شد که نتایج طراحی در جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشد. با استفاده از نسبت‌های به دست آمده، آزمایش مقاومت فشاری به منظور کنترل کیفیت مصالح و همچنین بررسی صحت طرح اختلاط، صورت پذیرفت. برای این کار از قالب‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر استفاده شد و از هر تیپ مخلوط، سه نمونه بر اساس استاندارد ASTM C39 ساخته شد. اگر میانگین مقاومت فشاری حداقل سه نمونه، از مقاومت هدف بیشتر باشد، کیفیت بتن حاصل مورد تأیید خواهد بود. در نتیجه جمعاً ۹ نمونه تهیه و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حوضچه آب، تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند که نتایج این آزمایش در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بتن حاصل دارای مقاومت فشاری قابل قبولی بوده و برای ساخت روسازی بتنی مناسب می‌باشد.

پس از طراحی مخلوط‌های بتنی، نمونه‌های مربوط به آزمایش پاندول انگلیسی و پخش ماسه ساخته شدند و بافت درشت لازم بر روی آن‌ها ایجاد گردید. برای ساخت این نمونه‌ها از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر و عمق ۱۰/۵ سانتی‌متر استفاده شد. پرداخت اولیه این نمونه‌ها به وسیله کشیدن ماله بر روی سطح آن‌ها انجام شد و بدین ترتیب، سطحی کاملاً صاف (شبیه به آنچه که در روسازی‌های بتنی به چشم می‌خورد) پدید آمد. سپس برای ایجاد بافت به روش پخش سنگ‌دانه، از سنگ‌دانه‌های معمولی و همچنین مصالح خرده آسفالتی به جای مانده از ترمیم و بازسازی آسفالت استفاده گردید. هر یک از این دو نوع سنگدانه، در دو نوع دانه‌بندی تک اندازه، به قطرهای اسمی ۴/۷۵ و ۲/۳۶ میلی‌متر (به ترتیب، مانده روی الک‌های ۲/۳۶ و ۱/۱۸) مورد استفاده قرار گرفتند. بنابر این برای هر تیپ مخلوط بتنی، ۴ نمونه و در نتیجه مجموعاً ۱۲ نمونه به روش پخش سنگ‌دانه تهیه شد. گفتنی است که سنگ‌دانه‌ها به گونه‌ای بر روی نمونه‌ها پخش شده‌اند که ۸۰ درصد سطح آن‌ها را پوشانیده‌اند.

همچنین از هر تیپ مخلوط، یک نمونه بدون بافت درشت و دارای سطح کاملاً صاف ساخته شد. در نتیجه به طور کلی ۱۵ نمونه تهیه گشت. در شکل (۱) نمونه‌های ساخته شده با این روش‌ها نشان داده شده‌اند.

مقاومت لغزندگی در سطح تماس لاستیک و روسازی به دو فاکتور بافت ریز و بافت درشت روسازی وابسته است. در این تحقیق مقاومت اصطکاکی سطوح بتنی پرداخت شده، با ارزیابی شاخص‌های عدد آونگی (BPN) و عمق بافت درشت (MTD) مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی مقاومت اصطکاکی نمونه‌های بتنی ساخته شده، از دستگاه پاندول انگلیسی طبق استاندارد ASTM E303 استفاده شده است. در این آزمایش از کفشک بزرگ دستگاه که دارای ابعاد ۷۵/۷۵ × ۲۵/۴ × ۶/۳۵ میلی‌متر می‌باشد، استفاده می‌شود. طول مسیر حرکت لغزنده بر روی سطح، می بایست برابر با ۱۲۵ میلی‌متر باشد و برای انجام آزمایش، سطح نمونه‌ها بایستی کاملاً تمیز و همراه با کفشک لاستیکی خیس شود.

به منظور ارزیابی بافت درشت نمونه‌های بتنی از آزمایش پخش ماسه اصلاح شده طبق استاندارد ASTM E965 استفاده شده است. در روش پخش ماسه میدانی، جهت تعیین متوسط عمق بافت، قطر دایره تشکیل شده در سطح روسازی اندازه گرفته می‌شود، اما در روش پخش ماسه اصلاحی قطر نمونه ثابت می‌باشد و حجم ماسه اندازه‌گیری می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۴- نتایج آزمایش آونگ انگلیسی و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش آونگ انگلیسی مربوط به نمونه‌های ساخته شده، در جدول (۵) آورده شده است که در ادامه به تفسیر و تحلیل آن‌ها پرداخته خواهد شد.

جدول ۵- نتایج آزمایش پاندول انگلیسی بر روی نمونه‌های دارای بافت درشت به روش پخش سنگ‌ریزه

نوع سنگ‌ریزه	قطر اسمی سنگ‌ریزه	BPN		
		تیپ A	تیپ B	تیپ C
معمولی	۲/۳۶	۵۵	۵۲	۵۱
	۴/۷۵	۵۸	۶۰	۵۷
خرده آسفالتی	۲/۳۶	۵۲	۵۰	۵۱
	۴/۷۵	۵۵	۵۶	۵۵
بدون بافت	-	۴۷	۴۵	۴۲

با توجه به ردیف آخر جدول (۵) (که مقادیر BPN نمونه‌های بدون بافت را نشان می‌دهد) می‌توان نتیجه گرفت که برای سطوح بتنی صاف و بدون بافت، میزان مقاومت لغزندگی تنها تحت تأثیر نوع دانه‌بندی مخلوط و بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌های آن می‌باشد. لذا برازش خطی بین بافت ریز (BPN) و حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها (x) برای این وضعیت، طبق رابطه (۱) می‌باشد.

$$BPN = 0.491x + 37.95,\ R^2=0.898 \qquad (۱)$$

همانطور که در رابطه (۱) ملاحظه می‌شود، مقاومت لغزندگی با بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها رابطه مستقیم دارد. بدین ترتیب که با افزایش حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها از ۹/۵ میلی‌متر به ۱۲/۵ میلی‌متر، به میزان ۳ واحد (برابر با ۷/۱٪) و پس از آن از ۱۲/۵ میلی‌متر به ۱۹ میلیمتر، به اندازه ۲ واحد (برابر با ۴/۴٪)، به عدد آونگی افزوده شده است. یکی از دلایل این امر، درشت‌دانه‌تر شدن مخلوط بتنی است که باعث ایجاد سطح زبرتری می‌گردد. علاوه بر آن، با مراجعه به جدول (۲)، ملاحظه می‌شود که هرچه مخلوط درشت‌دانه‌تر شده است؛ دانه‌بندی آن نیز بازتر گشته است. طبق تحقیقات انجام شده، مخلوط‌های دارای دانه‌بندی باز، از مقاومت لغزندگی بیشتری برخوردارند و در مقابل، با چگال شدن دانه‌بندی، از مقاومت لغزشی کاسته می‌گردد. قابل ذکر است که مقادیر مذکور، از حداقل مقادیر مجاز توصیه شده توسط TRRL برای مقاومت لغزندگی راه‌ها کمتر می‌باشند که این مسأله، بیانگر این حقیقت است که در مورد روسازی‌های بتنی، حتماً باید از روش‌های مربوط به ایجاد بافت درشت استفاده نمود تا ایمنی کافی مسیر تأمین گردد.

مقادیر عدد آونگی که در جدول (۵) آورده شدند، باید برای دستیابی به اهداف مربوط به این پژوهش (یعنی در راستای مقایسه تأثیر عواملی از قبیل نوع سنگ‌دانه‌ها، قطر سنگ‌دانه‌ها و همچنین بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت لغزندگی) مرتب شده و میانگین مقادیر آن‌ها به منظور محاسبه پارامترهای رگرسیونی به دست آیند. جداول (۶) و (۷) میانگین اعداد آونگی مربوط به هر سه تیپ مخلوط را به ترتیب برای انواع و اقطار مختلف سنگ‌دانه‌ها نشان می‌دهند که در واقع برای رسم نمودارها و محاسبه معادله رگرسیون، از مقادیر موجود در این جداول استفاده شده است.

جدول ۶- میانگین مقادیر BPN برای انواع مختلف سنگ‌دانه و برای هر سه تیپ مخلوط

نوع سنگریزه	BPN		
	تیپ A	تیپ B	تیپ C
معمولی	۵۶/۵	۵۶	۵۴
خرده	۵۳/۵	۵۳	۵۳
میانگین	۵۵	۵۴/۵	۵۳/۵

جدول ۷- میانگین مقادیر BPN برای قطرهای اسمی مختلف سنگ‌دانه و برای هر سه تیپ مخلوط

قطر اسمی سنگریزه (mm)	BPN		
	تیپ A	تیپ B	تیپ C
۲/۳۶	۵۳/۵	۵۱	۵۱
۴/۷۵	۵۶/۵	۵۸	۵۶
میانگین	۵۵	۵۴/۵	۵۳/۵

۴-۱- تأثیر نوع سنگ‌دانه بر عدد آونگی

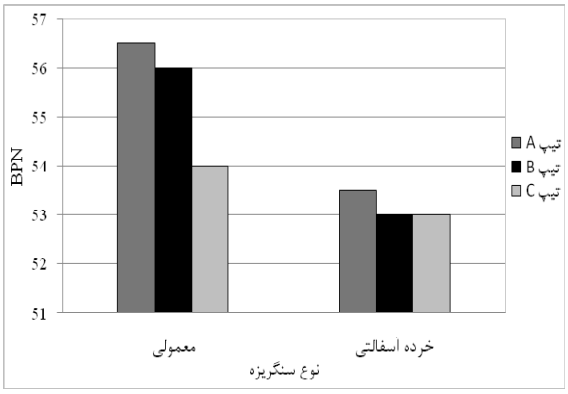
جهت بررسی تأثیر نوع سنگریزه بر مقاومت اصطکاکی سطح روسازی راه، رابطه بین مقادیر میانگین BPN (میانگین مقادیر BPN دو قطر اسمی مختلف در هر نوع سنگ‌دانه، که از جدول (۶) استخراج می‌گردند) و نوع سنگ‌دانه ارزیابی می‌گردد.

www.SID.ir

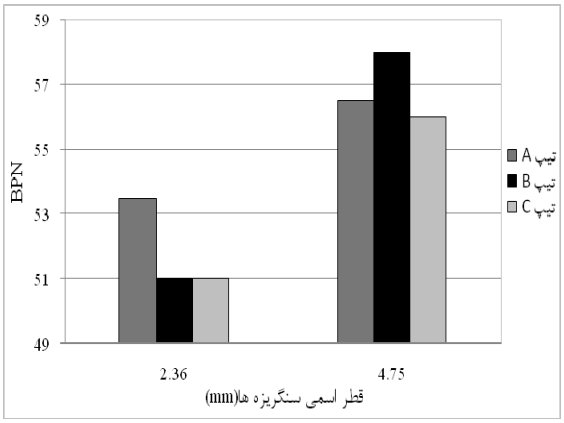
Archive of SID

چگونگی تغییر BPN در برابر تغییر نوع سنگ‌دانه مورد استفاده، در شکل (۲) برای هر سه تیپ مخلوط آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است مقاومت لغزشی و نوع سنگ‌دانه، رابطه معناداری با یکدیگر دارند و این بدان معنی است که به طور کلی با تغییر نوع سنگ‌دانه، مقاومت لغزندگی تغییر می‌نماید. در این وضعیت، استفاده از سنگ‌دانه خرده آسفالتی موجب کاهش میانگین عدد آونگی به میزان ۲/۳ واحد (برابر با ۴/۲٪) نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی شده است. از دلایل این امر می‌توان به مسأله وجود لایه قیر پیرامون مصالح خرده آسفالتی اشاره نمود که باعث می‌شود تا تماس سنگ‌دانه‌ها با لغزنده لاستیکی ناقص شود و کفشک، روی سطح نمونه سر بخورد. این مسأله موجب کاهش اتلاف انرژی جنبشی آونگ گشته و بنابراین هنگام بالا رفتن بازوی آونگ، ارتفاع بیشتری پیموده می‌شود. در نتیجه مقدار BPN کمتری قرائت خواهد شد.



شکل ۲- نحوه تغییرات بافت ریز و انواع مختلف سنگ‌دانه برای هر سه تیپ مخلوط



شکل ۳- نحوه تغییرات بافت ریز و قطرهای اسمی مختلف سنگ‌دانه برای هر سه تیپ مخلوط

۴-۲- تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه بر عدد آونگی

جهت بررسی تأثیر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت اصطکاکی سطح رویه، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین BPN (میانگین مقادیر BPN دو نوع سنگ‌دانه مختلف در هر قطر اسمی، که از جدول (۷) استخراج می‌شوند) و قطر اسمی سنگ‌دانه اقدام شد. نحوه تغییر BPN در برابر تغییر قطر اسمی سنگ‌دانه، در شکل (۳) برای هر سه تیپ مخلوط آورده شده است.

با توجه به شکل (۳) این مطلب قابل برداشت است که مقاومت اصطکاکی و افزایش اندازه اسمی سنگ‌دانه، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش میزان قطر سنگ‌دانه، مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که با افزایش قطر اسمی از ۲/۳۶ به ۴/۷۵ میلی‌متر، میانگین عدد آونگی به میزان ۵ واحد (برابر با ۹/۶٪) افزایش می‌یابد که این موضوع به علت افزایش زبری سطح ناشی از درشت‌تر شدن سنگ‌دانه‌های سطح بتن و به تبع آن افزایش افت انرژی جنبشی حرکت آونگ می‌باشد.

۴-۳- تأثیر بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها بر عدد آونگی در وضعیت پخش سنگ‌دانه

جهت بررسی تأثیر بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌های مخلوط بتن بر مقاومت لغزشی سطح دارای بافت درشت به روش پخش سنگ‌دانه، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین کل BPN (میانگین کل مقادیر مربوط به هر تیپ مخلوط که در دو نوع و دو قطر مختلف به دست آمده و از ردیف آخر جداول (۶) و (۷) استخراج می‌گردند) و NMSA پرداخته شد. معادله رگرسیون مربوط به روند تغییرات بافت ریز (BPN) و حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها (x) در رابطه (۲) آورده شده است.

$$BPN=0.145x + 52.35,\ R^2=0.849 \qquad (۲)$$

با افزایش بزرگترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها از ۹/۵ به ۱۲/۵ میلی‌متر و سپس از ۱۲/۵ به ۱۹ میلی‌متر، میانگین عدد آونگی به ترتیب به میزان ۱/۵ واحد (برابر با ۲/۸٪) و ۰/۵ واحد (برابر با ۰/۹٪) افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه مقاومت لغزندگی با حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها رابطه مستقیم دارد و با درشت‌شدن سنگ‌دانه‌های بتن، مقادیر BPN افزایش یافته‌اند، اما این رابطه اثر زیادی بر تغییر مقاومت

www.SID.ir

Archive of SID

اصطکاکی سطح ندارد. چرا که میزان تغییرات، اندک بوده و بنابراین مقدار BPN با تغییر اندازه سنگ‌دانه‌های مخلوط، تغییر چشمگیری نخواهد نمود. این امر بدین دلیل است که با پخش سنگ‌دانه بر روی سطح بتن، بافت مناسبی بوجود می‌آید و در نتیجه تغییر اصطکاک ناشی از تغییر در نوع دانه‌بندی، در مقایسه با اصطکاک ایجاد شده توسط بافت درشت به قدری ناچیز می‌باشد که قابل چشم‌پوشی است. یعنی با مؤثر واقع شدن سنگ‌دانه‌ها، اثر درشت‌دانه یا ریزدانه بودن سنگ‌دانه‌های مخلوط بتنی کم اثر گشته‌اند و مقاومت لغزندگی تولید شده، عمدتاً تحت تأثیر بافت درشت بوده است.

۵- نتایج آزمایش پخش ماسه و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش پخش ماسه برای نمونه‌های ساخته شده به روش پخش سنگدانه، به ترتیب در جدول (۸) آورده شده است که در ادامه به تفسیر و تحلیل آن‌ها پرداخته خواهد شد. گفتنی است که انجام آزمایش پخش ماسه، بر روی نمونه‌های بتنی بدون بافت درشت (سطح صاف) به دلیل ناچیز بودن عمق بافت، مقدور نمی‌باشد، بنابراین می‌توان مقدار MTD مربوط به این نمونه‌ها را برابر با صفر در نظر گرفت.

در روش پخش سنگ‌دانه، با توجه به استفاده از دو نوع سنگ‌دانه و هر کدام در دو قطر، لازم است تا برای مقایسه این دو پارامتر مؤثر بر مقادیر MTD، آن‌ها را طوری ترتیب داد که میانگین‌گیری از آن‌ها مفید فایده واقع گردد. جداول (۹) و (۱۰) میانگین MTDهای مربوط به هر سه تیپ مخلوط را به ترتیب برای انواع و اقطار مختلف سنگ‌دانه‌ها نشان می‌دهند که برای رسم نمودار و محاسبه رگرسیون، از آن‌ها استفاده شده است.

جدول ۸- نتایج آزمایش پخش ماسه بر روی نمونه‌های دارای بافت درشت به روش پخش سنگ‌دانه

نوع سنگریز	قطر اسمی سنگریزه	MTD (mm)		
		تیپ C	تیپ B	تیپ A
معمولی	۲/۳۶	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۴
	۴/۷۵	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۵
خرده آسفالتی	۲/۳۶	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۵
	۴/۷۵	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۷

جدول ۹- میانگین مقادیر MTD برای انواع مختلف سنگریزه و برای هر سه تیپ مخلوط

نوع سنگریزه	MTD (mm)		
	تیپ A	تیپ B	تیپ C
معمولی	۰/۱۵۰	۰/۱۴۰	۰/۱۴۵
خرده آسفالتی	۰/۱۶۵	۰/۱۸۰	۰/۱۶۰
میانگین	۰/۱۵۷	۰/۱۶۰	۰/۱۵۳

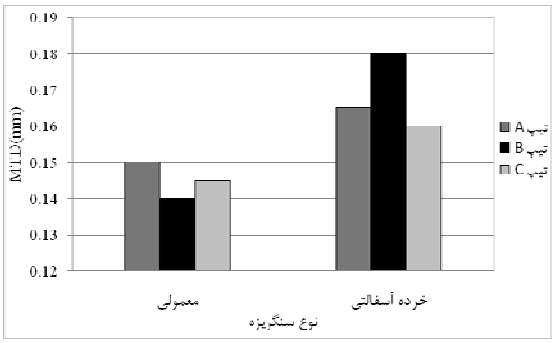
جدول ۱۰- میانگین مقادیر MTD برای قطرهای اسمی مختلف سنگریزه و برای هر سه تیپ مخلوط

قطر اسمی سنگریزه (mm)	MTD (mm)		
	تیپ A	تیپ B	تیپ C
۲/۳۶	۰/۱۳۵	۰/۱۳۰	۰/۱۴۵
۴/۷۵	۰/۱۸۰	۰/۱۹۰	۰/۱۶۰
میانگین	۰/۱۵۷	۰/۱۶۰	۰/۱۵۳

۵-۱- تأثیر نوع سنگ‌دانه بر عمق بافت درشت

جهت بررسی تأثیر نوع سنگ‌دانه بر عمق بافت درشت روسازی راه، رابطه بین مقادیر میانگین MTD (میانگین مقادیر MTD دو قطر اسمی مختلف در هر نوع سنگ‌دانه، که از جدول (۹) استخراج می‌گردند) و نوع سنگ‌دانه مورد ارزیابی قرار گرفت. روند تغییرات MTD در مقابل تغییرات نوع سنگ‌دانه به کار رفته، در شکل (۴) برای هر تیپ مخلوط آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، عمق بافت درشت و نوع سنگ‌دانه، به یکدیگر مربوط می‌باشند و این بدین معنی است که به طور کلی با تغییر نوع سنگ‌دانه، مقدار عمق بافت درشت تغییر می‌نماید.



شکل ۴- نحوه تغییرات عمق بافت درشت و انواع مختلف سنگ‌دانه برای هر سه تیپ مخلوط

www.SID.ir

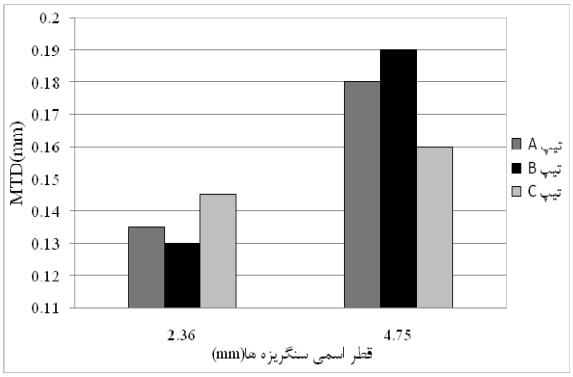
Archive of SID

در این مورد، استفاده از سنگریزه خرده آسفالتی موجب افزایش میانگین *MTD* به میزان ۰/۰۲۳ میلی‌متر (برابر با ۱۵/۹٪) نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی شده است.

۵-۲- تأثیر قطر اسمی سنگ‌دانه بر عمق بافت درشت

جهت بررسی تأثیر اندازه اسمی سنگ‌دانه بر عمق بافت درشت روسازی‌های بتنی، رابطه بین مقادیر میانگین *MTD* (میانگین مقادیر *MTD* دو نوع سنگدانه مختلف در هر قطر اسمی که از جدول (۱۰) استخراج می‌شوند) و قطر اسمی سنگ‌دانه ارزیابی می‌شود. نحوه تغییر *MTD* در برابر تغییر اندازه اسمی سنگ‌دانه، در شکل (۵) برای هر سه تیپ مخلوط آورده شده است.

با توجه به شکل (۵) مقدار *MTD* و افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه، رابطه مستقیم با یکدیگر داشته و با افزایش میزان قطر سنگ‌دانه، عمق بافت درشت افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که با افزایش قطر اسمی از ۲/۳۶ به ۴/۷۵ میلی‌متر، میانگین MTD به میزان ۰/۰۴ میلی‌متر (برابر با ۲۹/۲٪) افزایش می‌یابد که مسلماً این تفاوت به دلیل اختلاف حجم ماسه مورد نیاز برای پر کردن فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها می‌باشد.



شکل ۵- نحوه تغییرات عمق بافت درشت و قطرهای اسمی مختلف سنگدانه برای هر سه تیپ مخلوط

۵-۳- تأثیر بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها بر عمق بافت درشت در وضعیت پخش آن‌ها

جهت بررسی تأثیر NMSA مخلوط بتن بر عمق بافت درشت سطح بتنی دارای بافت درشت به روش پخش سنگدانه، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین کل *MTD* (میانگین کل مقادیر مربوط به هر تیپ مخلوط که در دو قطر و دو نوع مختلف به دست آمده و از ردیف آخر جداول (۹) و (۱۰) استخراج می‌گردند) و NMSA پرداخته شد. معادله رگرسیون مربوط به روند تغییرات بافت درشت (*MTD*) و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها (x) در رابطه (۳) آورده شده است.

$$MTD=0.000x + 0.151,\ R^2=0.233 \qquad (۳)$$

با توجه به R^2 به دست آمده، رابطه مربوط به NMSA و *MTD* قابل استناد نیست. مشاهده می‌گردد که با افزایش حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها از ۹/۵ به ۱۲/۵ میلیمتر و سپس از ۱۲/۵ به ۱۹ میلی‌متر، میانگین *MTD* به ترتیب به میزان ۰/۰۰۷ میلی‌متر (برابر با ۴/۶٪) افزایش و در ادامه به اندازه ۰/۰۰۳ واحد (برابر با ۱/۹٪) کاهش می‌یابد. با توجه به ناچیز بودن شیب معادله در این حالت، رابطه مذکور اثر قابل توجهی بر تغییر عمق بافت درشت سطحی ندارد و عمق بافت درشت مستقل از اندازه دانه‌های مخلوط بتنی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

با نگاه کلی به آنچه که مورد کنکاش قرار گرفت، می‌توان نتایج زیر را استنتاج نمود:

۱- با دقت در مقادیر عدد آونگی مربوط به نمونه‌های بتنی بدون بافت درشت و دارای سطح کاملاً صاف، مشاهده می‌شود که این مقادیر از حداقل مقادیر لازم ذکر شده توسط آیین‌نامه TRRL، کمتر بوده و به هیچ عنوان نمی‌توانند ایمنی کافی مسیر را تأمین نمایند. این مسأله، بیانگر این حقیقت است که در مورد روسازی‌های بتنی، حتماً باید از روش‌های مربوط به ایجاد بافت درشت استفاده نمود.

۲- در روش پخش سنگ‌دانه، استفاده از سنگ‌دانه معمولی موجب افزایش میانگین عدد آونگی به میزان ۴/۲ درصد نسبت به سنگ‌دانه‌های خرده آسفالتی شده است. همچنین مقاومت اصطکاکی و افزایش قطر اسمی سنگ‌دانه، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش میزان قطر سنگ‌دانه، مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که با افزایش قطر اسمی از ۲/۳۶ به ۴/۷۵ میلی‌متر، میانگین عدد آونگی به میزان ۹/۶ درصد افزایش می‌یابد.

۳- با نگاه به روند تغییرات عدد آونگی نسبت به تغییرات حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها در نمونه‌های مربوط به روش پخش سنگ‌دانه، می‌توان گفت که رابطه مستقیم بین این دو وجود دارد. محاسبه میانگین درصد تغییرات، نشانگر افزایش عدد آونگی به میزان ۱/۸ درصد می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۴- با مقایسه شدت اثر تغییر در نوع و قطر سنگ‌دانه‌ها و اندازه سنگ‌دانه‌های مخلوط، این مطلب قابل برداشت است که تغییر در قطر سنگ‌دانه بیشترین اثر بر تغییر میزان *BPN* را دارد و پس از آن تغییر در نوع سنگ‌دانه و نهایتاً تغییر اندازه سنگ‌دانه‌های مخلوط بر مقاومت لغزندگی مؤثر خواهند بود.

۵- در ارتباط با تأثیر سه عامل نوع، قطر و اندازه سنگ‌دانه‌های مخلوط بتنی بر عدد آونگی، بایستی خاطر نشان نمود که تغییرات خطی هیچ یک از این عوامل موجب تغییرات خطی عدد آونگی نخواهد شد. یعنی در صورتی که هر یک از این عوامل، در گام‌های ثابت و مشخصی افزایش یا کاهش یابند، عدد آونگی در گام های ثابت تغییر نخواهد نمود. بنابر این لازم است تا با دقت نظر در امر بهینه‌یابی، بتوان بافت درشت سطح روسازی را به گونه‌ای طراحی نمود که الزامات مربوط به آلایندگی صوتی و کیفیت سواری خودروها نیز مد نظر قرار گیرد.

۶- در روش پخش سنگ‌دانه، استفاده از سنگ‌دانه خرده آسفالتی موجب افزایش عمق بافت درشت به میزان ۱۵/۹ درصد نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی شده است. همچنین با افزایش میزان قطر سنگ‌دانه، مقاومت لغزندگی افزایش یافته است. بدین ترتیب که با افزایش قطر اسمی از ۲/۳۶ به ۴/۷۵ میلی‌متر، میانگین عدد آونگی به میزان ۲۹/۲ درصد افزایش می‌یابد. ضمناً محاسبه میانگین درصد تغییرات عمق بافت درشت نسبت به تغییرات حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها، نشانگر افزایش عمق بافت به میزان ۱/۳۵ درصد می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در بین سه عامل نوع و قطر سنگ‌دانه‌ها و اندازه سنگ‌دانه‌های مخلوط، به ترتیب تغییر در قطر سنگ‌دانه و سپس تغییر در نوع آن و نهایتاً تغییر اندازه سنگ‌دانه‌های مخلوط بیشترین اثر بر تغییر میزان *MTD* را دارند.

۷- با نگاهی اجمالی به میانگین مقادیر عدد آونگی مربوط به روش پخش سنگ‌دانه، بایستی ادعا نمود که این روش گزینه مناسبی برای تأمین ایمنی مسیرهای بتنی می‌باشد؛ اما با توجه به حداقل مقادیر *BPN* توصیه شده توسط آیین‌نامه *TRRL*، نمی‌توان از این روش در اماکنی مانند میادین، قوس‌های افقی با شعاع کمتر از ۱۵۰ متر و رویکردهای نزدیک به چراغ راهنمایی استفاده نمود.

۷- مراجع

[۱] حسنی، ا.، "بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی رویه‌های بتنی و آسفالتی"، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه، چاپ دوم، زمستان ۱۳۸۴.

[2] Hosking, J. R., "Road Aggregate and Skidding", Transport Research Laboratory, Department of Transport, State-of-Art, Review 4, HMSO, London, 1992.

[۳] سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور، "سالنامه آماری حمل و نقل جاده‌ای"، دفتر فناوری اطلاعات، ۱۳۸۸.

[۴] جان‌محمدی، ا.، "بررسی تأثیر شیارهای با عمق متغیر بر مقاومت لغزشی سطح رویه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، ۱۳۸۸.

[5] Lee, Y. P. K., Fwa, T. F., Choo, Y. S., "Skid Resistance Evaluation of Concrete Pavement Surfaces", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2003, 5, 972-984.

[6] Hall, J. W., Smith, K. L., Littleton, P., "Texturing of Concrete Pavements", NCHRP Project 10-67, Report 634, 2009.

[7] Ardani, A., "Implementation of Proven PCCP Practices in Colorado", Colorado Department of Transportation, Report No. CDOT-DTD-R-2006-9, 2006.

[۸] حسنی، ا.، "اصطکاک در رویه‌های روسازی راه"، جزوه آموزشی، ۱۳۸۸.

[۹] طاری‌بخش، م.، "بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی راه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران، ۱۳۹۰.

www.SID.ir