

## ارزیابی تاثیر نوع سنگدانه، دانه‌بندی و رزین بر عملکرد لغزشی و سایشی

### روسازی با اصطکاک بالا

حسن زیاری، مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسن دیوانداری (مسئول مکاتبات)، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

**E-mail: divandari@iauns.ac.ir**

محمدحسین ابراهیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۳

#### چکیده

در دهه اخیر، افزایش اصطکاک سطحی همواره از دغدغه‌های اصلی راهسازی دنیا در جهت افزایش ایمنی و کاهش تصادفات جاده‌ای بوده است. مقاومت اصطکاکی تایر با سطح روسازی به دو عامل اصلی مشخصات فنی لاستیک و خواص اصطکاکی روسازی، وابسته است. مهمترین فاکتورهای تامین کننده اصطکاک در روسازی، بافت ریز و درشت آن می‌باشد. عامل اول، باعث ایجاد مقاومت اصطکاکی در سرعت‌های کم و عامل دوم در سرعت‌های بالا، نقش اصلی را ایفا می‌کنند. تکنولوژی سطوح با اصطکاک بالا که استفاده از لایه نازکی از رزین پلیمری جهت استقرار سنگدانه‌های اصطکاک بالا بر روی روسازی است، روشی موثر در جهت افزایش اصطکاک سطحی روسازی آسفالتی است. در این پژوهش، تغییرات اعداد اصطکاکی نمونه‌های آسفالتی پوشش داده شده با انواع لایه‌های مختلف اصطکاک بالا با استفاده از دستگاه پاندول انگلیسی، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد بررسی شامل پانزده نوع سنگدانه در سه دانه‌بندی مختلف و دو نوع رزین پلیمری بوده است. در ادامه، نمونه‌ها در دستگاه شتابدهنده صیقل قرار گرفته و مجدداً مقاومت سایشی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت و عدد اصطکاکی و ضریب اصطکاک جنبشی هر یک تعیین شد. نتایج نشان داد از میان ترکیبات زوج برای دانه‌بندی نوع یک، بوکسیت کلسینه و دولومیت با عدد اصطکاکی ۱۰۸ برای حالت خشک و برای دانه‌بندی نوع دو، گرانیت و سیلیس با عدد اصطکاکی ۹۹ برای حالت خشک و همینطور برای دانه‌بندی نوع سه، بوکسیت کلسینه و سیلیس با عدد اصطکاکی ۹۵ برای حالت خشک و همچنین از میان ترکیبات خالص به کار رفته در روسازی اصطکاک بالا، بوکسیت کلسینه با اعداد اصطکاکی به ترتیب ۱۰۷، ۱۱۱ و ۱۰۵ برای دانه‌بندی نوع اول تا سوم در حالت خشک بیشترین اعداد اصطکاکی را داشتند. همچنین مشخص شد که میانگین اعداد اصطکاکی دانه‌بندی‌های سه‌گانه نمونه‌های حاوی رزین اپوکسی در حالات خشک و تر به ترتیب تقریباً ۱۵ و ۱۳ درصد از نمونه‌های مشابه حاوی رزین پلی‌استر بیشتر است. سطوح حاوی بوکسیت کلسینه دارای بهترین عملکرد اصطکاکی اولیه و پس از سایش و نمونه‌های دولومیتی و آذرین به ترتیب ضعیف‌ترین نتایج را داشته‌اند.

واژگان کلیدی: اصطکاک سطحی، عدد اصطکاکی، سطوح اصطکاک بالا، مقاومت سایشی، رزین اپوکسی

## ۱. مقدمه

آمار بالای کشتگان و مجروحان حوادث جاده‌ای منتشر شده توسط پزشک قانونی کشور، لزوم تلاش بیشتر جهت ارتقای ایمنی جاده‌ای را روشن می‌سازد. در حال حاضر در راه‌های کوهستانی یا باران‌خیز کشور در بعضی موارد با ایجاد خراش در روسازی، اصطکاک لازم تامین می‌شود که خود می‌تواند باعث ایجاد خرابی‌های متعدد در روسازی شود. اما احداث سطوح با اصطکاک بالا در مناطق دارای آب و هوای برفی و باران‌خیز به ویژه در مناطق کوهستانی بسیار کارآمدتر است. همچنین سطوح با اصطکاک بالا در بسیاری از کشورهای جهان در قوس‌ها، تقاطع‌ها و خطوط عبور عابرین پیاده و ایستگاه‌های اتوبوس جهت افزایش اصطکاک لازم برای توقف یا کم کردن سرعت وسایل نقلیه اجرا می‌شود. شناخت هر چه بیشتر پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد کوتاه مدت و بلند مدت این سطوح، امکان استفاده هرچه بهتر از آن را مهیا می‌سازد.

## ۲. پیشینه پژوهش

نخستین بار در سال ۱۹۶۷ سطوح با اصطکاک بالا جهت افزایش ایمنی جاده‌ای در ۸۰۰ مقطع از جاده‌های بریتانیا به صورت آزمایشی اجرا گردید. ارزیابی‌های اولیه حاکی از کاهش تصادفات به میزان ۳۰٪ بود [FHWA report, 2017]. از ابتدای قرن بیستم میلادی مطالعات گسترده‌ای در راستای بررسی تاثیرات این تکنولوژی در کاهش تصادفات و افزایش ایمنی جاده‌ای و همچنین بررسی متغیرهای هزینه - فایده این طرح صورت گرفت. در ادامه به بررسی بخشی از این مطالعات پرداخته شده است.

میرابی مقدم و خیبری در یک تحقیق، تاثیر تغییر دما بر افزایش اصطکاک روسازی را مورد بررسی قرار دادند. در این پروژه از چهار نوع سنگدانه در ساخت مخلوط آسفالتی گرم استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش درجه حرارت، میزان مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد سرباره فولاد بیشترین افزایش مقاومت را نتیجه می‌دهد [Mirabi moghaddam and Akbari, 2015].

ایمنی جاده‌ای به عنوان یک مساله جدی در مسائل شبکه حمل و نقل، همواره مورد توجه بوده و به نوبه خود بر ظرفیت و کارایی شبکه جاده‌ای، تاثیر مستقیم می‌گذارد. طبق اعلام سازمان بهداشت جهانی، هر ساله حدود ۱/۲۵ میلیون نفر در حوادث جاده‌ای کشته می‌شوند [WHO, 2015]. علاوه بر این، آمار نشان می‌دهد که مسئولین کشورهای اروپایی، بین ۲ تا ۵ درصد از تولید ناخالص داخلی کشور خود را به کاهش حوادث جاده‌ای اختصاص داده‌اند. به گزارش پلیس شهر منچستر انگلستان از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ از میان ۱۰۷۴ تصادف جاده‌ای، حدود ۴۱ درصد آن‌ها مربوط به تصادفات در شرایط مرطوب است [Karzan and Razzaq, 2017]. مراجعه به این آمار لزوم نگرش جدید در افزایش ایمنی جاده‌ای و به ویژه در مساله افزایش کنترل رانندگان بر وسایل نقلیه را در شرایط لغزنده سطوح روسازی، آشکار می‌سازد. اصطکاک سطح روسازی به عنوان نیرویی تعریف می‌شود که مقاومت نسبی یک تایلر خودرو را بر روی سطح روسازی در هنگام چرخش لاستیک یا ترمز یا سرخوردن، تامین می‌کند [Zahir, 2016]. در سال‌های اخیر اقدامات زیادی جهت ارائه روش‌های گوناگون برای بهبود و همچنین برآورد پارامترهای اصطکاک سطحی در روسازی‌های مختلف انجام شده است. یکی از روش‌های افزایش اصطکاک سطحی، استفاده از سطوح با اصطکاک بالا<sup>۱</sup> است. بدین منظور لایه‌ای از جنس رزین پلیمری جهت چسباندن مصالح اصطکاک بالا بر روی روسازی آسفالتی به کار می‌رود. سنگدانه‌های اصطکاک بالایی که در این پروژه‌ها به کار می‌روند، عموماً دارای مقاومت اصطکاک و سایشی بالایی هستند. هدف از این پروژه بررسی و مقایسه اعداد آونگ انگلیسی<sup>۲</sup> نمونه‌های آسفالتی اصطکاک بالا به وسیله دستگاه پاندول انگلیسی و مطالعه مقاومت سایشی نمونه‌ها پس از قرارگیری تحت تاثیر دستگاه شتاب‌دهنده صیقل است.

در کار تحقیقاتی دیگری، وندی چن بررسی جامعی از عملکرد سطوح با اصطکاک بالا از طریق تجزیه و تحلیل اطلاعات حوادث ترافیکی در ایالت پنسیلوانیا انجام داد. هدف این پروژه کمک به کارشناسان جهت دستیابی به اهداف زیر عنوان شده بود:

۱. ارائه روشی برای مکان یابی بهتر مقاطعی از روسازی که برای اجرای رویه اصطکاک بالا در اولویت هستند.
۲. پردازش اطلاعات تصادف ها برای تجزیه و تحلیل میزان اثر بخشی رویه های اجرا شده با اصطکاک بالا [Wendi Chen, 2018].

الحسن و همکارانش تحقیقاتی را جهت مقایسه تجهیزات اندازه گیری و نمایشگری پیشرفته بافت و اصطکاک روسازی و تجهیزات مکانیکی اندازه گیری این پارامترها، ترتیب دادند. این بررسی ها نشان داد دستگاه های بافت سنج مکانیکی به تنهایی و بدون استفاده از تجهیزات مناسب اندازه گیری و نمایش دقیق نمی توانند تعریف جامعی از بافت روسازی ارائه دهند [Alhasan et al., 2018].

تسای و همکارانش با بررسی پارامترهای تحقیق اخیر و همچنین تعداد و شدت تصادفات و با استفاده از تجهیزات دقیق سنجش الکترونیکی سطح، پارامترهایی را که برای اجرای سطوح اصطکاک بالا باید لحاظ شوند، مورد بررسی دقیق قرار دادند. در این تحقیقات از حسگرهایی با حساسیت بالا<sup>۷</sup> در برداشت اطلاعات روسازی و شناسایی مقاطع نیازمند اجرای رویه با اصطکاک بالا در مقاطع هندسی مختلف، استفاده شد [Tsai et al., 2018].

در پروژه تحقیقاتی دیگری، فریل و وودوارد به بررسی استفاده از سایر سنگدانه های اصطکاک بالا در کنار بوکسیت کلسینه پرداختند. بهترین نتایج مربوط به سطوح در ترکیب انواع بوکسیت و توف آتشفشانی و بدترین نتایج در ترکیبات شامل گرانیت بود [Friel and Woodward, 2019].

در همین سال افسو، آلمیدا و فائل به بررسی بافت شناسی و مقاومت لغزشی روسازی های دولایه متخلخل پرداختند. عمق

دو سال بعد طی تحقیقی دیگر، ذات اکرم، میرابی مقدم و خیبری به بررسی تاثیر انواع آلاینده ها در کاهش اعداد اصطکاک روسازی نسبت به حالت خشک پرداختند. در حالت خشک، ماسه بادی و در حالت تر رنگ های ترافیکی ایمن، ۴۹ تا ۵۵ درصد کاهش در مقدار عدد اصطکاک را نتیجه دادند

[Zatakram, Mirabi moghaddam and Khabiri, 2017].

تحقیقاتی دیگر در سال ۲۰۱۵ به وسیله هیتمن، ترنر و گریر انجام شد. در این تحقیق به بررسی عملکردی هفت نوع سنگدانه جایگزین در سطوح با اصطکاک بالا پرداخته شد. بررسی ها نشان داد که بین بافت درشت روسازی و اعداد اصطکاک رابطه مستقیم وجود دارد. همچنین مشخص شد که سطوح اصطکاک بالای ساخته شده با استفاده از سنگدانه های بوکسیت کلسینه و گرانیت دارای بیشترین اعداد اصطکاک هستند [Heitzman and Turner and Greer, 2015].

در پژوهشی دیگر ظهیر، سطوح اصطکاک بالا را بر روی دال های بتنی اجرا کرد. ارزیابی مقادیر ضریب اصطکاک سطحی و همچنین عمق بافت در قالب آزمایش هایی به وسیله ابزار آزمایش سنجش دینامیکی اصطکاک و دستگاه بافت سنج مدور<sup>۳</sup> انجام شد. بررسی ها نشان داد که سنگدانه های آذرین جایگزین خوبی برای بوکسیت کلسینه جهت ارتقاء اصطکاک سطحی هستند. نتایج آزمایش دستگاه بافت سنج مدور نشان داد که مقادیر زبری سطح روسازی بعد از اجرای رویه اصطکاک بالا، افزایش می یابد [Zahir, 2016].

در فعالیت آزمایشگاهی دیگری لی در دپارتمان حمل و نقل هند، بررسی هایی در مورد تغییرات اصطکاک در طول عمر خدمت روسازی انجام داد. او در این پروژه در مقیاس آزمایشگاهی جهت بررسی ویژگی های مصالحی که در سطوح با اصطکاک بالا به کار می روند، آزمایش هایی (از جمله ارزش سایشی سنگدانه ها<sup>۸</sup> و سایش لس آنجلس<sup>۵</sup> و ضریب سایش سنگدانه ها<sup>۹</sup>) ترتیب داد. اعداد اصطکاک نمونه های حاوی سنگدانه های ریزتر، قبل و بعد از سایش در دستگاه شتابدهنده صیقل دارای اعداد اصطکاک بیشتری بودند [Li, 2017].

#### ۴. روش تحقیق

در پروژه حاضر در راستای تحقیقات انجام شده ضمن ساخت نمونه‌های آسفالتی و اجرای رویه‌های با اصطکاک بالا حاوی مصالح سنگدانه‌ای متنوع در سه دانه‌بندی مختلف و دو نوع چسباننده، اعداد اصطکاکی نمونه‌های با اصطکاک بالا، ارزیابی شد. همچنین با ساخت نمونه‌های دستگاه شتابدهنده صیقل<sup>۹</sup>، تغییر اصطکاک لغزشی نمونه‌های استاندارد حاوی مصالح مذکور در اثر سایش مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۵. برنامه آزمایشگاهی

عملیات آزمایشگاهی در دو مرحله زیر صورت گرفت:

##### ۱-۵ مرحله ۱: آزمایش پاندول نمونه‌های اصطکاک

##### بالا

نمونه‌های آسفالتی با قطر ۱۵ سانتیمتر با میزان قیر بهینه ساخته شده و سطوح اصطکاک بالا با مصالح با مشخصات زیر بر سطح نمونه‌ها اجرا گردید. سپس با استفاده از پاندول انگلیسی در دو حالت خشک و تر، اعداد اصطکاکی جهت بررسی خصوصیات روسازی‌های اصطکاک بالا، برداشت و ثبت گردید. متغیرهای مورد استفاده در ساخت انواع نمونه‌های اصطکاک بالا در این پژوهش شامل موارد زیر بودند:

۱. پنج نوع سنگدانه گوناگون شامل: بوکسیت کلسینه، گرانیت، سیلیس، دولومیت و بازالیت به طور خالص
۲. نوع ترکیب سنگدانه‌های با اصطکاک بالای مذکور به نسبت‌های برابر که در مجموع با در نظر گرفتن حالت خالص، ۱۵ حالت ترکیب سنگدانه‌ای را تشکیل دادند.
۳. سه نوع دانه‌بندی شامل دانه‌بندی‌های حد بالا، پایین و میانه در بازه دانه‌بندی استاندارد رویه‌های اصطکاک بالا.
۴. دو نوع چسباننده شامل رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر.

##### ۲-۵ مرحله ۲: آزمایش پاندول نمونه‌های سایش داده

شده با دستگاه شتابدهنده سایش

بافت به وسیله دستگاه بافت‌سنج مدور و روش پخش ماسه<sup>۸</sup> اندازه‌گیری و مقایسه شد. مشخص شد که عمق بافت روسازی بدست آمده از آزمون پخش شن و ماسه، در حالت استفاده از ماسه به میزان ۰/۳ بیشتر از زمانی است که از گوی شیشه‌ای در این آزمایش استفاده شود. در بررسی اعداد اصطکاکی، تمام آزمایش‌ها دارای ارزش اعداد پاندول انگلیسی بیش از ۶۰ بود که منطبق با مشخصات استاندارد اداره حمل و نقل پرتغال بود [Afonso, Almeida and Fael, 2019].

همانگونه که ملاحظه گردید، تاکنون مطالعات محدودی پیرامون بررسی اصطکاک لغزشی سطوح با اصطکاک بالا صورت گرفته است. محققانی مانند هیتمن تحقیقاتی پیرامون تاثیر سنگدانه‌های مختلف بر افزایش اصطکاک رویه آسفالتی انجام دادند. اما متغیرهای این مطالعات محدود بوده و بیشتر مباحث مطرح شده در مورد سطوح با اصطکاک بالا در مورد مسائل بافت‌شناسی است. در این پروژه مطالعه میزان افزایش اصطکاک لغزشی حاصل از اجرای این سطوح روی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از مصالح متنوع‌تر و در حالت ترکیبی و در دانه‌بندی متعدد صورت گرفت. نوع چسباننده اصطکاک بالا رویه‌ها نیز به عنوان متغیر موثر بر اصطکاک سطوح، مورد بررسی قرار گرفت. در این پروژه سعی شده است با به کارگیری مصالح متفاوت و بررسی متغیرهای مختلف، اصطکاک سطحی نمونه‌های با اصطکاک بالا در حالت‌ها و ترکیبات گوناگون، بررسی و مقایسه گردد.

#### ۳. نوآوری پژوهش

در این مطالعه میزان افزایش اصطکاک لغزشی حاصل از اجرای سطوح با اصطکاک بالا روی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از مصالح متنوع، با در نظر گرفتن حالات ترکیبی مصالح و در دانه‌بندی متعدد بررسی شد. نوع چسباننده اصطکاک بالا نیز به عنوان متغیر موثر بر اصطکاک سطوح، ارزیابی گردید. به بیان واضح‌تر، در پژوهش حاضر سعی شده است که با به کارگیری مصالح متنوع و متغیرهای مختلف، اصطکاک سطحی نمونه‌های با اصطکاک بالا مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد.

دانه‌بندی ۹۰ نمونه آسفالتی ساخته شده	
مشخصه الک	مانده روی الک (درصد)
شماره ۵۰	۱۸
شماره ۲۰۰	۸
عبوری از شماره ۲۰۰	۲

#### ۵-۳-۱-۲ مصالح لایه اصطکاک بالا

مصالح به کار رفته در لایه اصطکاک بالا شامل سنگدانه‌های اصطکاک بالا و رزین بودند که در ادامه تشریح می‌گردد.

#### ۱. سنگدانه‌های اصطکاک بالا

بر اساس آیین نامه دپارتمان حمل و نقل کانزاس<sup>۱۰</sup> در خصوص ساخت رویه‌های اصطکاک بالا، سنگدانه‌های دارای دوام و مقاومت سایشی و گوشه‌داری بالا برای لایه اصطکاک بالا انتخاب می‌شوند. سنگدانه‌های مصالح اصطکاک بالا شامل بوکسیت کلسینه، سیلیس، دولومیت، گرانیات و بازالت به میزان کافی دانه-بندی شدند. سنگدانه‌های اصطکاک بالای سیلیس و دولومیت از ملایر همدان، بازالت از لواسان تهران، گرانیات از خرمدره زنجان و بوکسیت کلسینه از شرکت مواد اولیه نسوز پامیدا تامین گردید.

#### ۲. رزین

همچنین در ساخت رویه اصطکاک بالا، جهت چسباندن مصالح بر روی نمونه‌ها از دو نوع رزین شامل رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر استفاده گردید. رزین به کار رفته در این پروژه شامل رزین اپوکسی<sup>۱۱</sup> و رزین پلی‌استر تامین شده از شرکت پارس گوهر می‌باشد. نوع رزین انتخابی بر اساس استاندارد خصوصیات رویه‌های اصطکاک بالا می‌باشد. جدول ۲ خصوصیات کاربردی رزین اپوکسی را نشان می‌دهد.

#### جدول ۲. خصوصیات رزین اپوکسی استفاده شده در پژوهش

ویژگی	مقدار	واحد
ویسکوزیته	۴۸۰۰-۴۹۰۰	cps
مقاومت فشاری	۷۰۰۰	Psi
مقاومت کششی	۴۳۰۰	Psi
زمان گیرش	۲۵-۳۰	دقیقه

لازم به ذکر است نرخ استفاده از سنگدانه و رزین در ساخت مخلوط با استفاده از جدول ۳ و دانه‌بندی لازم با استفاده از جدول

در ادامه نمونه‌های مورد نیاز دستگاه شتابدهنده سایش با استفاده از سنگدانه‌های اصطکاک بالای به کار رفته در نمونه‌های آسفالتی مرحله قبل و در دانه‌بندی استاندارد، ساخته شده و اعداد اصطکاک نمونه‌ها قبل و بعد از سایش در دو حالت خشک و تر، تعیین گردید.

در ادامه به تشریح دو مرحله گفته شده، پرداخته می‌شود.

#### ۵-۳-۳ آزمایش پاندول انگلیسی نمونه‌های اصطکاک

#### بالا

این آزمایش شامل ساخت نمونه‌های آسفالتی و اجرای رویه اصطکاک بالا و تست پاندول انگلیسی بر اساس استاندارد ASTM E303 است که در ادامه تشریح می‌شود.

#### ۵-۳-۱-۳ انتخاب مصالح مصرفی

مصالح مصرفی شامل مصالح به کار رفته در نمونه‌های آسفالت گرم و رویه اصطکاک بالای اجرا شده روی آنها می‌باشد که در ادامه تشریح می‌گردد.

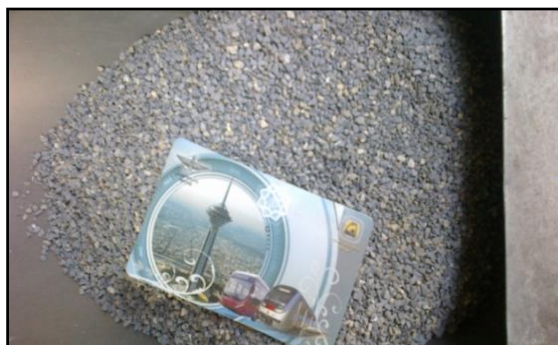
#### ۵-۳-۱-۱ مصالح نمونه‌های آسفالتی

مصالح به کار رفته در این پروژه شامل مصالح کوهی با ملاحظات آیین‌نامه‌ای و قیر جهت ساخت نمونه‌های آسفالت گرم است. دانه‌بندی به کار رفته جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی، دانه‌بندی ارائه شده در جدول ۱ مطابق با ستون ۴ جدول دانه‌بندی پیوسته بتن آسفالتی مخصوص رویه و آستر مندرج در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) است. از این دانه‌بندی، ۹۰ نمونه آسفالتی برای بررسی تغییرات اعداد اصطکاک بر اساس پارامترهای مختلف رویه اصطکاک بالا، ساخته شد. همچنین قیر مورد استفاده در این پژوهش از نوع ۶۰-۷۰ و تولید شرکت نفت جی بود.

#### جدول ۱. دانه‌بندی سنگدانه نمونه‌های آسفالتی (نشریه ۲۳۴)

دانه‌بندی ۹۰ نمونه آسفالتی ساخته شده	
مشخصه الک	مانده روی الک (درصد)
۱۲/۵ میلیمتر	۵
شماره ۴	۵۱
شماره ۸	۱۶

نمونه‌های آسفالتی در دو مرحله ساخته شدند. در مرحله اول قیر بهینه به وسیله روش مارشال تعیین گردید و در مرحله دوم تعداد ۹۰ نمونه آسفالتی در دستگاه ژیراتوری ساخته شدند.



شکل ۱. اندازه سنگدانه‌های لایه اصطکاک بالا (بوکسیت کلسینه)

۴ تعیین گردید. همچنین کنترل شد که خصوصیات رزین مصرفی، مطابق با شرایط استاندارد عنوان شده در جدول ۵ باشد.

### ۲-۳-۵ ساخت نمونه‌ها

ابتدا نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای براساس استاندارد آزمایش پاندول انگلیسی آماده سازی شدند. در مرحله بعد رویه با اصطکاک بالا بر روی سطح نمونه‌ها اجرا گردید (شکل ۱). در ادامه این دو مرحله بیان می‌گردد.

### ۱-۲-۳-۵ ساخت نمونه‌های آسفالتی

جدول ۳. نرخ استفاده از اجزای مخلوط رویه اصطکاک بالا [KDOT, 2015]

نرخ استفاده از سنگدانه (حداقل)	نرخ پخش رزین پلیمری
$1.77 m^3 / m^2$	$17 lbs / m^2$

جدول ۴. الزامات دانه‌بندی برای سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت لایه با اصطکاک بالا [KDOT, 2015]

نمره الک	نمره ۴	نمره ۸	نمره ۱۶	نمره ۳۰	نمره ۵۰	نمره ۱۰۰
درصد مانده روی هر الک	۰	۵-۰	۱۰۰-۹۵	۱۰۰-۹۹	۱۰۰-۹۹	۱۰۰-۹۹

جدول ۵. خصوصیات رزین مصرفی در ساخت لایه رویه با اصطکاک بالا

میزان	استاندارد	خصوصیات
3000 - 7000 cps	ASTM D 2196	ویسکوزیته
15-45 minutes	ASTM C 881	زمان گیرش
>5000 psi.	ASTM C 579	مقاومت فشاری سه ساعته
2000-5000 psi	ASTM D 638	مقاومت کششی ۷ روزه
30-80 percent	ASTM D 638	ازدیاد طول ۷ روزه (در نقطه شکست)
<100 coulombs.	AASHTO T 277	درجه نفوذ یون کلرید

نمونه‌های آسفالتی با مشخصات استاندارد و در قیر بهینه بدست آمده از روش مارشال در دستگاه متراکم کننده دورانی<sup>۱۲</sup> ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌ها، تنش فشاری دستگاه برابر ۶۰۰ کیلوپاسکال، نرخ دوران ۳۰ دور بر دقیقه و زاویه انحراف ۱/۲۵ درجه، تنظیم شد. همچنین برای ساخت نمونه‌های آسفالتی، دستگاه متراکم کننده طوری تنظیم گردید که نمونه‌های با قطر

۱. تعیین قیر بهینه

قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی با استفاده از روش مارشال تحت استاندارد ASTM D1559 تعیین گردید. بر اساس نتایج آزمایش‌های تعیین قیر بهینه، میزان قیر بهینه و درصد فضای خالی برای ۹۰ نمونه آسفالتی به ترتیب ۵/۲۳ و ۴ درصد محاسبه شد.

۲. ساخت نمونه‌های آسفالتی

ارزیابی تاثیر نوع سنگدانه، دانه بندی و رزین بر عملکرد لغزشی و سایشی روسازی با اصطکاک بالا

۲. لایه حاوی چسباننده پلی استر

نحوه اجرای رویه حاوی این رزین همانند مراحل اجرا رزین اپوکسی است، اما با دو تفاوت عمده زیر:

۱- رزین پلی استر به کار رفته سه جزئی (شامل چسب پلی استر، کبالت و اسید مخصوص) است. به این صورت که برای هر ۱۰۰ گرم چسباننده پلی استر میزان ۰/۵ گرم کبالت و ۲ گرم اسید به کار برده می شود.

۲- زمان استراحت دستیابی نمونه ها به مقاومت بالای ۹۵ درصد، ۲۴ ساعت است.

### ۳-۳-۵ آزمایش پاندول انگلیسی

در انتها بر روی نمونه های اصطکاک بالای ساخته شده، آزمایش پاندول انگلیسی بر اساس استاندارد ASTM E303 انجام شد. شکل های ۳ تا ۵ نحوه اندازه گیری مقادیر اعداد اصطکاکی نمونه ها را در حالات خشک و تر نشان می دهد.

### ۵-۴ آزمایش پاندول انگلیسی نمونه های دستگاه صیقل

جهت بررسی تاثیر سایش بر میزان عدد اصطکاک لغزشی سطوح دارای سنگدانه های اصطکاک بالا، از دستگاه شتابدهنده صیقل استفاده شد. بدین منظور برای هر یک از پنج نوع سنگدانه، نمونه استاندارد دستگاه شتابدهنده صیقل ساخته شده و به وسیله پاندول انگلیسی در دو حالت خشک و تر مورد آزمایش قرار گرفتند.

سپس نمونه ها در دستگاه شتابدهنده صیقل به مدت شش ساعت مورد سایش قرار گرفته و در نهایت بار دیگر در حالات خشک و تر، اعداد اصطکاکی آنها به وسیله دستگاه پاندول انگلیسی تعیین گردید (نتایج بعد از سه و شش ساعت سایش، ثبت شدند).



شکل ۳. اندازه گیری عدد اصطکاکی نمونه های آسفالتی

۱۵ سانتیمتر دارای ۴ درصد فضای خالی باشند. بدین ترتیب با توجه به مشخص بودن حداکثر وزن مخصوص آزمایشگاهی در آزمایش رایس، تعداد دوران دستگاه ژیراتوری برای رسیدن به چگالی معادل با درصد فضای خالی چهار درصد، ۹۵ دوران تعیین شد. در ادامه نمونه های استوانه ای ساخته شده، در ضخامت ۵ سانتیمتر، برش داده شدند.

### ۵-۳-۲ اجرای لایه با اصطکاک بالا

همان طور که بیان گردید، ۹۰ نمونه برای آزمایش پاندول انگلیسی ساخته شد. نیمی از این نمونه ها حاوی رزین اپوکسی و نیمی دیگر حاوی رزین پلی استر بودند. در ادامه شیوه اجرای لایه های اصطکاک بالا تشریح می گردد.

۱. لایه حاوی چسباننده رزین اپوکسی

رزین اپوکسی به میزان لازم برای ساخت یک نمونه شامل خود چسب و سخت کننده آن به نسبت یک به دو (یک برابر سخت کننده و دو برابر چسب) با یکدیگر مخلوط شدند. پس از این که مخلوط رزین اپوکسی به خوبی به حالت همگن درآمد، مخلوط در سطح آسفالت به طور کامل پخش شد تا سطحی صاف و بدون فرورفتگی یا برجستگی ایجاد شود. باید دقت شود تمام سطح به خوبی به مایع چسب آغشته شود. سپس بر روی سطح نمونه آغشته به رزین اپوکسی، مصالح اصطکاک بالا ریخته شده و از قرارگیری کامل مصالح بر روی چسب اطمینان حاصل می شود. زمان به دست آوردن مقاومت ۹۵ درصدی رزین اپوکسی، ۲۴ ساعت و مقاومت ۱۰۰ درصدی آن، یک هفته است. شکل ۲ عملیات اجرای لایه اصطکاک بالا را نشان می دهد.



شکل ۲. اجرای لایه اصطکاک بالا روی نمونه های آسفالتی



## ۶. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها

نتایج کلیه آزمایش‌ها در واقع اعداد اصطکاکی پاندول انگلیسی یا همان خروجی دستگاه پاندول انگلیسی است که در دو مرحله از نمونه‌های آسفالتی حاوی رویه با اصطکاک بالا و همچنین نمونه‌های دستگاه شتابدهنده صیقل، برداشت گردید. آزمایش پاندول تحت استاندارد ASTM E303 انجام گردید.

### ۱-۶ نتایج آزمون پاندول انگلیسی برای نمونه‌های با

#### اصطکاک بالا

همانطور که اشاره شد پنج نوع سنگدانه به صورت خالص و همچنین در ترکیب با نسبت برابر، جمعاً ۱۵ حالت سنگدانه‌ای بوجود آمد. به علاوه سه نوع دانه‌بندی برای این سنگدانه‌ها و دو نوع رزین پلیمری به عنوان چسباننده جهت اجرای رویه اصطکاک بالا به کار رفت.

بنابراین در حالت کلی ۹۰ نمونه در بخش اول مورد آزمایش پاندول انگلیسی قرار گرفت.

در ادامه نتایج این آزمایش تحت متغیرهای زیر در نمونه‌های اصطکاک بالا بررسی می‌شود:

۱. تاثیر نوع سنگدانه مصرفی بر مقدار اصطکاک لغزشی
۲. تاثیر دانه‌بندی بر اصطکاک لغزشی
۳. مقایسه عملکرد رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر

### ۱-۱-۶ تاثیر نوع سنگدانه مصرفی بر میزان اصطکاک

#### لغزشی (دانه‌بندی نوع یک)

در شکل ۷ مقادیر اعداد اصطکاکی نمونه‌های اصطکاک بالا برای دانه‌بندی نوع یک در حالت‌های خشک و تر، ارائه شده است.



شکل ۴. علامتگذاری میزان طولی که لغزنده پاندول باید طی کند



شکل ۵. اسپری آب جهت تعیین عدد اصطکاک سطح در حالت تر

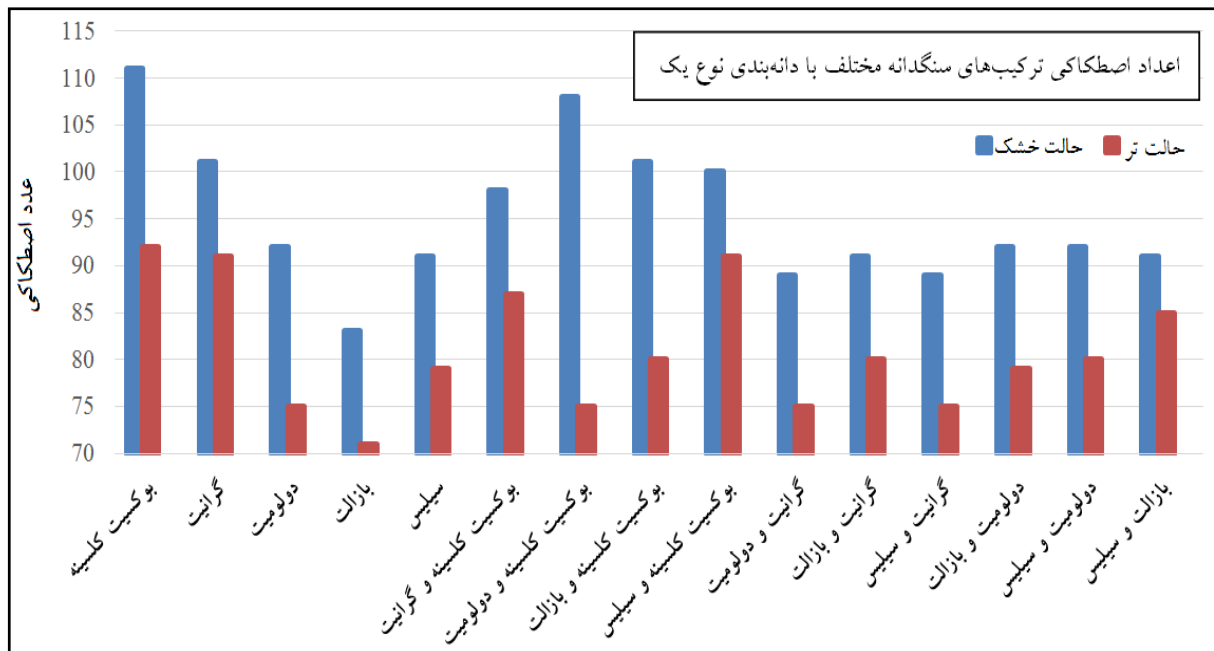
این آزمایش در کلیه مراحل شامل ساخت نمونه‌ها و سایش به وسیله دستگاه آزمایش Wessex - S882 تحت استاندارد BSEN 1097 - 88 - انجام شد. دانه‌بندی به کار رفته در این آزمایش براساس استاندارد، ۶/۳ تا ۹/۵ میلیمتر است. شکل ۶ نمونه‌های دستگاه شتاب‌دهنده سایشی ساخته شده را نشان می‌دهد

[shabani, 2011]



شکل ۶. نمونه‌های سایشی ساخته شده از انواع مصالح سنگی





شکل ۷. اعداد اصطكاكي تعیین شده لایه اصطكاك بالا در دو حالت تر و خشك برای انواع تركيب مصالح سنگي با دانه‌بندی نوع يك

در شکل ۸ مقادیر اعداد اصطكاكي نمونه‌های اصطكاك بالا برای دانه‌بندی نوع دو در حالات خشك و تر، ارائه شده است.

۱-۲-۱-۶ تحلیل نمودار نوع سنگدانه مصرفی در دانه‌بندی

نوع دو

از بین ترکیبات سنگدانه‌ای برای دانه‌بندی نوع دو، بوکسیت کلسینه و گرانیت بیشترین و بازالت کمترین اعداد اصطكاكي را دارا هستند. از میان ترکیبات زوج برای دانه‌بندی نوع دو، گرانیت و سیلیس دارای بیشترین اعداد اصطكاكي هستند.

برای رعایت اختصار تنها نمودارهای سطوح با اصطكاك بالای حاوی چسباننده‌ی رزین اپوکسی نمایش داده شده است (نتایج مربوط به رزین پلی‌استر در جدول ۶ جداگانه بررسی می‌گردد).

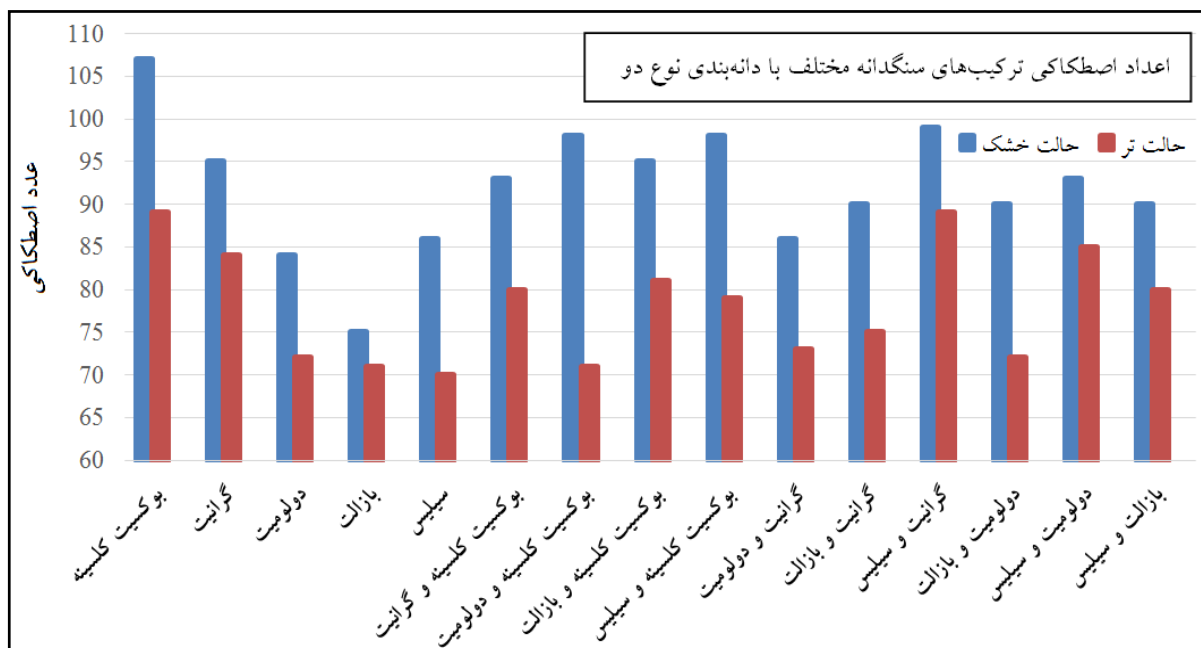
۱-۱-۱-۶ تحلیل نمودار نوع سنگدانه مصرفی در دانه‌بندی

نوع يك

از بین ترکیبات سنگدانه‌ای برای دانه‌بندی نوع يك، بوکسیت کلسینه و گرانیت بیشترین و بازالت کمترین اعداد اصطكاكي را دارا هستند. از میان ترکیبات زوج برای دانه‌بندی نوع يك، بوکسیت کلسینه و دولومیت دارای بیشترین اعداد اصطكاكي هستند.

۲-۱-۶ تاثیر نوع سنگدانه مصرفی بر مقدار اصطكاك

لغزشی (دانه‌بندی نوع دو)



شکل ۸. اعداد اصطکاکی تعیین شده لایه اصطکاک بالا در دو حالت تر و خشک برای انواع ترکیب مصالح سنگی با دانه‌بندی نوع دو

### ۳-۱-۶ تاثیر نوع سنگدانه مصرفی بر میزان اصطکاک

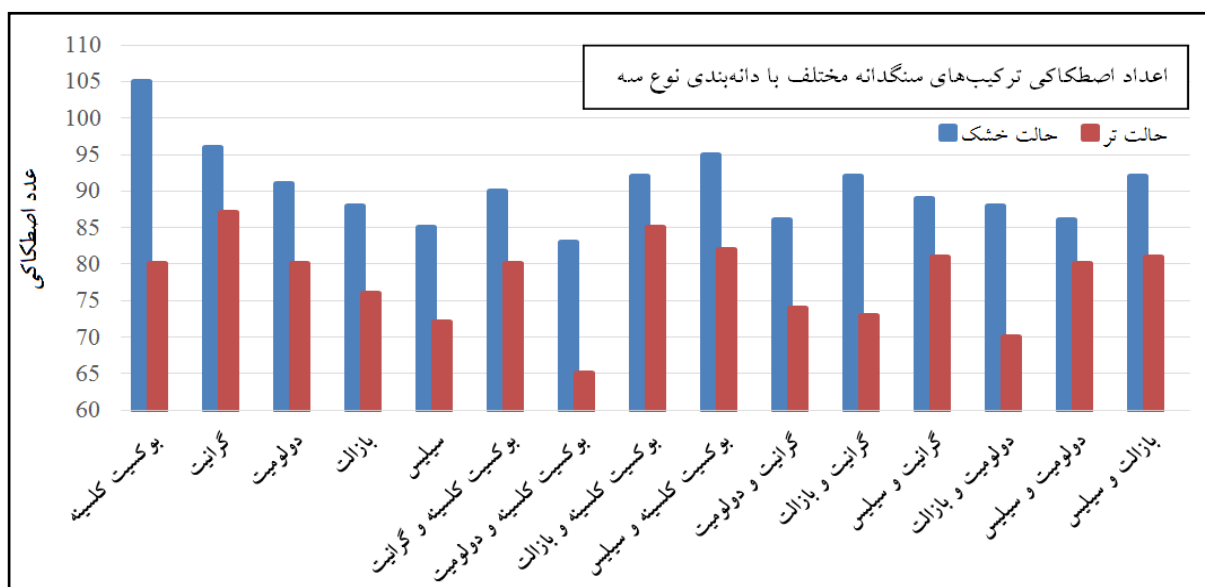
لغزشی (دانه‌بندی نوع سه)

در شکل ۹ مقادیر اعداد اصطکاکی نمونه‌های اصطکاک بالا برای دانه‌بندی نوع سه در دو حالت خشک و تر، ارائه شده است.

### ۱-۳-۱-۶ تحلیل نمودار نوع سنگدانه مصرفی در دانه‌بندی

نوع سه

از بین ترکیبات سنگدانه‌ای برای دانه‌بندی نوع سه، بوکسیت کلسینه و گرانیت بیشترین و بازالت کمترین اعداد اصطکاکی را دارا هستند. از میان ترکیبات زوج برای دانه‌بندی نوع سه، بوکسیت کلسینه و سیلیس دارای بیشترین اعداد اصطکاکی هستند.



شکل ۹. اعداد اصطکاکی تعیین شده لایه اصطکاک بالا در دو حالت تر و خشک برای انواع ترکیب مصالح سنگی با دانه‌بندی نوع سه

برای حالت خشک از دانه‌بندی اول تا دوم به میزان ۳/۳۳ درصد و از دانه‌بندی دوم به سوم ۱/۴ درصد کاهش داشته است. این مقادیر برای اعداد اصطکاکی نمونه‌ها در حالت تر به میزان ۲/۹ و ۰/۳۳ بوده است.

افزایش مقادیر اعداد اصطکاکی بر اثر افزایش اندازه دانه‌بندی بیشتر به علت افزایش اندازه بافت درشت سنگدانه‌ای است. البته به علت کوچک بودن بازه تغییرات دانه‌بندی، این میزان کم است.

#### ۶-۱-۴ تاثیر دانه‌بندی بر مقدار اصطکاک لغزشی (نوع

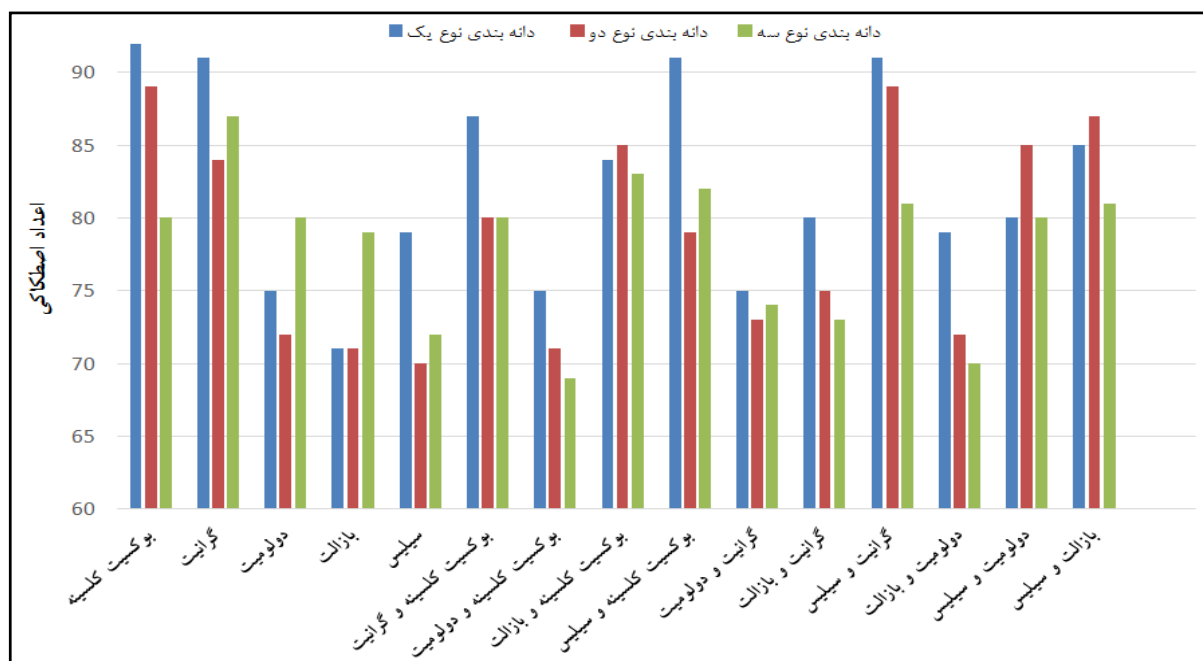
رزین مصرفی : رزین اپوکسی)

در شکل ۱۰ تاثیر دانه‌بندی بر اعداد اصطکاکی سطوح اصطکاک بالا در حالت خیس نشان داده شده است.

#### ۶-۱-۱-۱ تحلیل نمودار تاثیر دانه‌بندی بر میزان اصطکاک

لغزشی

همانطور که از نمودار مقایسه اعداد اصطکاکی بر اساس دانه بندی (شکل ۱۰) برداشت می‌شود، میانگین اعداد اصطکاکی



شکل ۱۰. مقایسه عدد اصطکاکی سطوح با اصطکاک بالا بر اساس نوع دانه‌بندی

دانه‌بندی نوع اول از میانگین اعداد اصطکاکی نمونه‌های دارای دانه‌بندی نوع دوم در دو حالت خشک و تر به ترتیب  $3/33$  و  $2/93$  واحد کمتر بود. بر این اساس نمونه‌های حاوی دانه‌بندی نوع دوم در مقایسه با نمونه‌های دارای دانه‌بندی نوع سوم در حالات خشک و تر دارای میانگین اعداد اصطکاکی به ترتیب  $1/4$  و  $0/33$  کمتر بودند. این میزان هر چند ناچیز، نشانگر تاثیر کاهش عمق بافت درشت روسازی و در نتیجه کاهش اعداد اصطکاکی نمونه‌ها است.

#### ۶-۱-۵ مقایسه تاثیر کاربرد رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر بر اعداد اصطکاکی

در جدول ۶ میانگین اعداد اصطکاکی استخراجی برای ۱۵ نمونه اصطکاکی در هر سه دانه‌بندی و در حالت‌های خشک و تر در لایه‌های شامل رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر ارائه شده است.

جدول ۶. مقایسه میانگین اعداد اصطکاکی نمونه‌های اصطکاک بالای ساخته شده از رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر و با دانه‌بندی‌های مختلف

چسباننده لایه اصطکاک بالا	شرایط آزمایش	دانه‌بندی نوع یک	دانه‌بندی نوع دو	دانه‌بندی نوع سه
رزین اپوکسی	خشک	۹۵/۲۶	۹۱/۹۳	۹۰/۵۳
	تر	۸۱	۷۸/۰۶	۷۷/۷۳
رزین پلی‌استر	خشک	۹۱/۹۳	۹۰/۶	۹۰/۰۶
	تر	۷۹/۹۳	۷۸/۷۳	۷۹/۴۶

میانگین اعداد اصطکاکی نمونه‌های حاوی رزین پلی‌استر، بیشتر است. در مجموع عملکرد رزین اپوکسی در حالت خشک بهتر و در حالت تر تقریباً برابر عملکرد رزین پلی‌استر است. نکته دیگر در به کارگیری انواع رزین میزان گرانروی مناسب آن است. در صورتی که مایع رزین پس از ترکیب سه یا دو جزء بیش از اندازه ویسکوز باشد، ممکن است میزان رزینی که سطح بستر روسازی را ابتدا پوشش می‌دهد بیش از حدود استاندارد جدول ۳ باشد که موجب غرق شدن مصالح اصطکاک بالا و از بین رفتن کارایی اصطکاکی آنها شود. این پدیده بیشتر در استفاده از رزین اپوکسی دیده می‌شود. از طرفی در صورتی که رزین مصرفی دارای گرانروی کمتر از حد تعیین شده در جدول ۵ باشد، موجب نفوذ بیش از حد مجاز رزین در آسفالت شده و رزین چسبانندگی

کاهش اعداد اصطکاکی بر اساس دانه‌بندی در نمودارها استثناهایی هم مثل ترکیبات بازالیت، سیلیس و سیلیس همراه با دولومیت داشت که می‌تواند به واسطه استفاده از ترکیبات ضعیف دولومیتی یا بازالیتی باشد. همچنین بیشترین تاثیر دانه‌بندی بر روی اعداد اصطکاکی و به تبع آن مقاومت لغزشی در بوکسیت کلسینه و ترکیب زوج بوکسیت کلسینه و سیلیس مشاهده می‌شود که میزان اختلاف اعداد اصطکاکی برای دانه‌بندی نوع اول و سوم برای این دو رویه با اصطکاک بالا به ترتیب ۱۲ و ۹ واحد است. در این میان کمترین تاثیر نوع دانه‌بندی در زوج گرانیت، دولومیت با اختلاف ۲ واحد در اعداد اصطکاکی دانه بندی نوع اول و دوم است. در نمونه‌های اصطکاک بالای حاوی چسباننده رزین اپوکسی، میانگین اعداد اصطکاکی نمونه‌های دارای

#### ۶-۱-۵-۱ تحلیل تاثیر کاربرد رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر بر اعداد اصطکاکی

مقادیر موجود در جدول ۶ شامل میانگین اعداد اصطکاکی برای نمونه‌های خشک و تر روسازی اصطکاک بالا حاوی چسباننده رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر است. مقادیر اعداد اصطکاکی میانگین برای رزین اپوکسی در حالت خشک برای دانه‌بندی سنگدانه اصطکاک بالای اول تا سوم به ترتیب  $3/33$  و  $1/87$  و  $0/47$  از مقادیر متناظر برای سطوح اصطکاک بالای حاوی چسباننده رزین پلی‌استر بیشتر است. این میزان برای حالت تر بدین صورت است که در دانه‌بندی نوع یک میزان میانگین اعداد اصطکاکی تقریباً برای هر دو نوع چسباننده برابر است. اما برای دانه‌بندی‌های دوم و سوم به ترتیب به میزان  $0/67$  و  $1/72$

کافی برای سنگدانه‌های اصطکاک بالا را تامین نخواهد کرد. حدود تعیین شده برای میزان استفاده از مصالح و چسباننده رویه- های اصطکاک بالا در جدول ۳ ارائه گردید. با این حال از آنجا که میزان هزینه اولیه تهیه رزین پلی‌استر بسیار کمتر از رزین اپوکسی است، در مجموع استفاده از ترکیب پلی- استر توصیه می‌شود. این در صورتی امکانپذیر است که پیمانکار مربوطه از تجربه کافی در اجرای به موقع در زمان زل شدن رزین پلی‌استر، برخوردار باشد.

۶-۱-۶ نتایج پاندول انگلیسی برای نمونه‌های سایشی مقادیر اعداد اصطکاکی برای نمونه‌های سایشی ساخته شده حاوی تمامی سنگدانه‌های اصطکاک بالا شامل حالت قبل و بعد از سایش ۳ و ۶ ساعته در وضعیت‌های خشک و تر بررسی گردید. به دلیل اهمیت اصطکاک لغزشی در حالت تر، مقادیر اعداد اصطکاکی حالت تر ارائه شده است. این مقادیر در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. اعداد اصطکاکی نمونه‌های تر قبل از سایش، پس از سایش در بازه‌های زمانی سه و شش ساعت و درصد تغییر آن

نوع سنگدانه	مقدار عدد اصطکاک قبل از سایش	مقدار عدد اصطکاک پس از سه ساعت سایش نمونه	درصد کاهش عدد اصطکاک بعد از سه ساعت سایش	مقدار عدد اصطکاک پس از شش ساعت سایش نمونه	درصد کاهش عدد اصطکاک بعد از شش ساعت سایش
بوکسیت کلسینه	۹۲	۷۹	۱۴	۵۸	۴۰
گرانیت	۸۴	۶۰	۲۹	۴۰	۵۲
دولومیت	۸۰	۶۳	۲۱	۳۹	۵۱
بازالت	۷۵	۷۸	افزایش ۴ درصدی	۴۵	۶۶
سیلیس	۷۵	۵۲	۳۰	۴۴	۷۰

#### ۶-۱-۱-۶ تحلیل نتایج نمونه‌های شتابدهنده صیقل

در جدول ۷ مقادیر اعداد اصطکاکی استخراج شده از دستگاه پاندول انگلیسی در حالت تر برای قبل از سایش در دستگاه شتابدهنده صیقل و پس از سایش ۳ ساعت اول با پودر سمباده زبر و همچنین ۳ ساعت دوم با استفاده از پودر سمباده نرم نشان داده شد. این آزمایش برای تمامی پنج سنگدانه به کار رفته در این پروژه به صورت خالص انجام شد. مقادیر بعد از مراحل سایش ۳ ساعته کاهش پیدا کرد. در این میان بیشترین و کمترین اعداد اصطکاکی مربوط به بوکسیت کلسینه و سیلیس است. اعداد اصطکاکی بعد از ۳ ساعت سایش (سایش با پودر سمباده زبر) برای بوکسیت کلسینه و دولومیت به نسبت گرانیت و سیلیس بیشتر کاهش پیدا کرد. این مقادیر در ۳ ساعت سایش دوم (سایش با استفاده از پودر سمباده نرم) به عکس بوده و اعداد اصطکاکی بوکسیت کلسینه و دولومیت افت بیشتری به نسبت گرانیت و سیلیس پیدا کردند. میزان افت اصطکاک لغزشی برای

بعد از سایش به ترتیب ۳ و ۶ ساعته در بوکسیت کلسینه با ۱۴ و ۴۰ درصد، کمترین مقدار و در سیلیس با ۳۰ و ۷۰ درصد، بیشترین مقدار بود. اعداد اصطکاک برای بازالت بعد از سایش با پودر سمباده زبر، افزایش پیدا کرد. این امر می‌تواند به دلیل خصوصیات بافتی و پیوند کانی‌ها و ذرات تشکیل‌دهنده سنگدانه‌ای بازالت باشد. به طوری که بافت سطحی بازالت در تماس با پودر سمباده زبر دچار زبری اولیه شده و در مرحله بعد زبری ایجاد شده در اثر سایش با استفاده از پودر سمباده نرم کاهش پیدا کرده و اعداد اصطکاکی مجدداً کاهش پیدا کرد.

#### • بررسی یک رابطه

عملاً ارزش اعداد اصطکاکی استخراجی برابر با میزان ضریب اصطکاک جنبشی<sup>۱۳</sup> است. اما در حالت کلی میزان این پارامتر به علت حرکت خاص دینامیکی و پاندولی لغزنده‌های پاندول انگلیسی دارای خطای کوچک ولی غیر قابل چشم‌پوشی است. در نهایت براساس یک رابطه تجربی میزان ضریب اصطکاک

$$COF_{pendulum} = \left( \frac{110}{BPN} - \frac{1}{3} \right)^{-1} \quad (1)$$

BPN: عدد پاندول انگلیسی (ارزش صیقلی)

COF: ضریب اصطکاک جنبشی

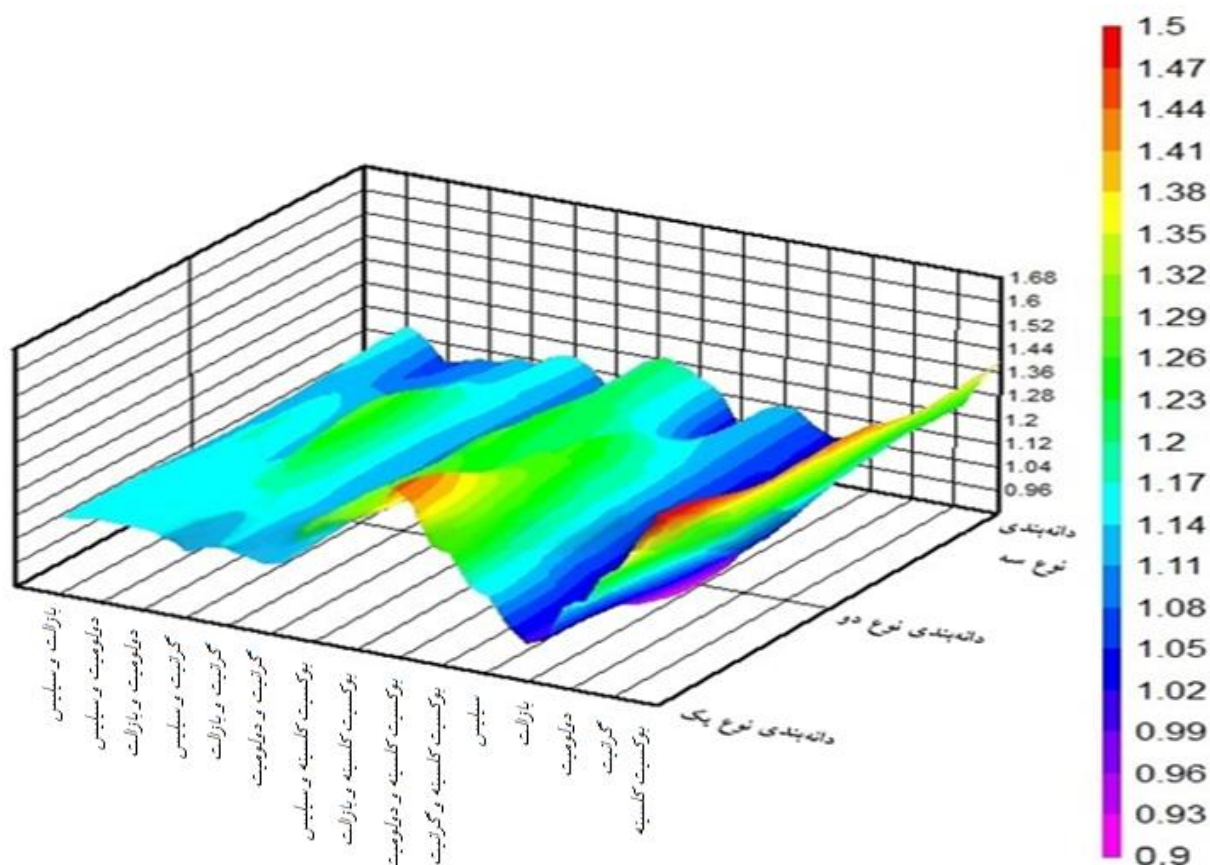
جنبشی بر اساس رابطه زیر از اعداد اصطکاکی بدست آمده و در

جدول ۸ درج گردید (نمایش نمودار سه بعدی این ضرایب در

شکل ۱۱ دیده می‌شود): [Clarke et al., 2014]

جدول ۸. مقادیر ضرایب اصطکاک جنبشی نمونه‌های با اصطکاک بالا در دو حالت تر و خشک و در دانه‌بندی‌های مختلف

مقادیر ضریب اصطکاک جنبشی نمونه‌ها						پارامتر
دانه‌بندی نوع سه		دانه‌بندی نوع دو		دانه‌بندی نوع یک		نوع دانه‌بندی
تر	خشک	تر	خشک	تر	خشک	حالت
۰/۹۶	۱/۴	۱/۱	۱/۴۴	۱/۱۶	۱/۵۲	بوکسیت کلسینه
۱/۰۷	۱/۲۳	۱/۰۲۴	۱/۲۱	۱/۱۴	۱/۳۲	گرانیت
۰/۹۶	۱/۱۴	۰/۸۴	۱/۰۲	۰/۸۸	۱/۱۶	دولومیت
۰/۸۹	۱/۰۹	۰/۸۲۲	۰/۸۸	۰/۸۲	۱/۰۰	بازالت
۰/۸۳	۱/۰۴	۰/۸	۱/۰۵	۰/۹۴	۱/۱۴	سیلیس
۰/۹۶	۱/۱۲	۰/۹۶	۱/۱۷	۱/۰۷	۱/۲۶	بوکسیت کلسینه و گرانیت
۰/۷۳	۱/۰۰	۰/۸۲	۱/۲۶	۰/۸۸	۱/۴۵	بوکسیت کلسینه و دولومیت
۱/۰۴	۱/۱۵	۰/۹۷	۱/۲۱	۰/۹۶	۱/۳۲	بوکسیت کلسینه و بازالت
۰/۹۹	۱/۲۱	۰/۹۴	۱/۲۶	۱/۱۴	۱/۳۰	بوکسیت کلسینه و سیلیس
۰/۸۶	۱/۰۵	۰/۸۵	۱/۰۵۷	۰/۸۸	۱/۱۰	گرانیت و دولومیت
۰/۸۵	۱/۱۶	۰/۸۸	۱/۱۲	۰/۹۶	۱/۱۴	گرانیت و بازالت
۰/۹۷	۱/۱	۱/۱	۱/۲۸	۰/۸۸	۱/۱۰	گرانیت و سیلیس
۰/۸	۱/۰۹	۰/۸۳	۱/۱۲	۰/۹۴	۱/۱۶	دولومیت و بازالت
۰/۹۶	۱/۰۵	۱/۰۴	۱/۱۷	۰/۹۶	۱/۱۶	دولومیت و سیلیس
۰/۹۷	۱/۱۶	۰/۹۶	۱/۱۲	۱/۰۴	۱/۱۴	بازالت و سیلیس



شکل ۱۱. مقایسه ضرایب اصطکاک جنبشی در ترکیبات مختلف سنگدانه‌ای و در سه نوع دانه بندی در حالت خشک

## ۷. نتیجه گیری

دارای بوکسیت کلسینه دارای بیشترین اعداد اصطکاکی و سطوح دارای بازالت دارای کمترین اعداد اصطکاکی بودند. به طور کلی در بازه مربوط به سنگدانه‌های اصطکاک بالا، هرچه دانه بندی درشت تر باشد میزان اعداد اصطکاکی افزایش می یابد. رزین اپوکسی دارای خصوصیات پرداخت و استفاده بهتر نسبت به رزین پلی استر بوده و اعداد اصطکاکی کمی بالاتری را نتیجه داد. اما در مقیاس اجرای میدانی به واسطه هزینه تمام شده کمتر و استفاده سریع تر، رزین پلی استر پیشنهاد می شود.

با توجه به ساختار آب وهوایی ایران و موقعیت کوهستانی بسیاری از راه‌های کشور، بالا بردن اصطکاک سطحی در مسیرهای دارای قوس تند به ویژه در مسیرهای لغزنده، دارای اهمیت فراوانی است. به همین جهت استفاده از روش اجرای سطوح اصطکاک بالا می تواند با بالا بردن ایمنی تا حد زیادی از هزینه‌های مالی و جانی در حوادث جاده‌ای بکاهد.

در این پروژه تحقیقاتی، سطوح اصطکاکی با ویژگی‌های گوناگون بررسی گردید و ملاحظه شد که صرف نظر از دانه بندی مصالح اصطکاک بالا، سطوح حاوی مصالحی مانند بوکسیت کلسینه و گرانیت بیشترین مقاومت اصطکاکی و همچنین سطوح دارای بازالت کمترین مقاومت اصطکاکی را دارا هستند. نکته قابل توجه این است که نوع سنگدانه مصرفی در ترکیبات زوج هم بر مقدار اعداد اصطکاکی تاثیر گذاشت. به طوری که زوج‌های

## ۸. پی نوشت‌ها

1. High Friction Surface Treatment (HFST)
2. British Pendulum Number (BPN)
3. Circular Texture Meter (CTM)
4. Aggregate Abrasion Value (AAV)
5. Los Angeles Abrasion (LAA)
6. Polished Stone Value (PSV)
7. Laser Texture Scanner (LTS)
8. Sand Patch
9. Polishing Accelerator Machine



tester", Transportation Research Record, Vol. 2672, No. 40, pp. 440-451.

- Chen, X.W. (2018) "Laboratory evaluation of an innovative and cost effective high-friction surface treatment", (Doctoral dissertation, Michigan State University), pp. 1-10.

- Clarke, J.D., Hallas, K., Lewis, R., Thorpe, S., Hunwin, G. and Carré, M.J. (2014) "Understanding the friction measured by standardized test methodologies used to assess shoe-surface slip risk", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 43, No. 4, pp. 723-734.

- Friel, S. and Woodward, D. (2019) "High friction surfacing systems using blends of natural aggregate and calcined bauxite", Coatings, Vol. 9, No. 3, pp. 177-188.

- Heitzman, M., Turner, P. and Greer, M. (2015) "High friction surface treatment alternative aggregates study", NCAT Report, No. 15-04, pp. 10-50.

- Karzan, S. and Razzaq, N.A. (2017) "Traffic accidents analysis on dry and wet road bends surfaces in greater manchester-UK", Kurdistan Journal of Applied Research, Vol. 2, No. 3, pp. 284-291.

- KDOT. (2015) "Special provision to the standard specification", Kansas Department of Transportation, 2015 edition, No. 07-PS0468, pp. 1-16.

- Li, S., Xiong, R., Yu, D., Zhao, G., Cong, P. and Jiang, Y. (2017) "Friction surface treatment selection: aggregate properties, surface characteristics, alternative treatments, and safety effects", No. FHWA/IN/JTRP-2017/09, pp. 1-10.

- Tsai, Y., Wu, Y.C. and Ai, C. (2018) "Identification of site characteristics for proactive high-friction surface treatment site selection using sensor-based, detailed, location-

10. Kansas Department of Transportation (KDOT)

11. Resin Epoxy

12. Gyrotory Compactor

13. Coefficient of Friction (COF)

## ۹. سپاسگزاری

نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از پرسنل مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) به دلیل همکاری در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی نمایند.

## ۱۰. منابع

- ذات اکرم، م.، خبیری، م.م. و میرابی مقدم، م.ح. (۱۳۹۶) "بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، دوره ۸، شماره ۴، ص. ۵۸۹-۶۰۲.

- شعبانی، ش. (۱۳۹۴) "ارزیابی خصوصیات سنگدانه‌های مورد استفاده در روسازی با استفاده از روش مقطع نازک و نقش آن در عملکرد لغزندگی رویه‌های راه"، پایان‌نامه دکترا، استاد راهنما: محمود احمدی‌نژاد، تهران: دانشکده عمران، گروه حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- میرابی مقدم، م.ح. و اکبری، ع. (۲۰۱۵) "بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوط‌های آسفالتی"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، دوره ۶، شماره ۴، ص. ۷۰۳-۷۱۶.

- Afonso, M.L., Almeida, M. and Fael, C.S. (2019) "Characterization of the skid resistance and mean texture depth in a permeable asphalt pavement In IOP conference series", Materials Science and Engineering, Vol. 471, No. 2, pp. 2029-2039.

- Alhasan, A., Smadi, O., Bou-Saab, G., Hernandez, N. and Cochran, E. (2018) "Pavement friction modeling using texture measurements and pendulum skid

- Zahir, H. (2016) "Performance of local aggregate in high friction surface treatment", (Doctoral dissertation, Kansas State University), pp. 38-78.

referenced curve characteristics data", Transportation Research Record, Vol. 2672, No. 38, pp. 1-13.

- WHO. (2015) "Global status report on road safety 2015", World Health Organization. Printed in Italy, pp. 1-257.

## ارزیابی تاثیر نوع سنگدانه، دانه بندی و رزین بر عملکرد لغزشی و سایشی روسازی با اصطکاک بالا

حسن زیاری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی راه، مدیریت روسازی راه ها و تکنولوژی قیر و آسفالت بوده و در حال حاضر استاد تمام دانشکده عمران در دانشگاه علم و صنعت ایران و رئیس مرکز تحقیقات قیر و مخلوط های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت است.



حسن دیواندری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه صنعتی شاهرود و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۸۳ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی و تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی، آزمایشگاه قیر و آسفالت، تکنولوژی روسازی، ترافیک و ترابری بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه آزاد اسلامی است.



محمدحسین ابراهیمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه شمال آمل و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران را در گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی های آسفالتی به ویژه مبحث اصطکاک سطحی روسازی آسفالتی می باشد.

