

## مروری بر آزمایش‌ها و حدود مشخصات سنگ‌دانه مخلوط آسفالتی برای ایجاد مقاومت لغزشی مناسب در روسازی آسفالتی

مقاله علمی - مروری

احمد منصوریان<sup>\*</sup>، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
محمد مهدی خیبری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
شاهین شعبانی، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران  
<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mansourian@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۹۶-۷۹

### چکیده

مقاومت لغزشی مناسب یکی از الزامات مهم در اجرای روسازی راه‌ها محسوب می‌شود؛ زیرا این عامل نقش تعیین کننده‌ای در تأمین ایمنی تردد وسایل نقلیه به‌ویژه در شرایط بارندگی ایفا می‌کند. در این راستا بافت ریز رویه آسفالتی که در درجه اول تابع خصوصیات سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی است، نقشی اساسی در ایجاد اصطکاک و مقاومت لغزشی بین روسازی و لاستیک وسیله نقلیه دارد؛ بنابراین لازم است قبل از تهیه مخلوط آسفالتی از کیفیت مناسب سنگ‌دانه‌ها اطمینان حاصل شود. با توجه به آنکه مؤسسات و محققان مختلف آزمایش‌های متنوعی را برای این منظور پیشنهاد کرده‌اند، در پژوهش حاضر سعی شده است ضمن معرفی هر یک از این آزمایش‌ها، حدود مشخصات پیشنهادی برای پارامترهای حاصل از هر یک از آزمایش‌ها نیز بررسی و ارائه شود. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد هیچ آزمایشی به تنهایی نمی‌تواند نشان دهنده عملکرد مطلوب سنگ‌دانه در فرآیند مقاومت لغزشی مورد نیاز باشد؛ ضمن آنکه محدوده مشخص و منحصر به فردی را نیز نمی‌توان برای خروجی این آزمایش‌ها معرفی کرد؛ با این وجود، مقادیر پیشنهادی حاصل از تحقیقات و تجارب موجود را می‌توان به عنوان راهنمای اولیه در تعیین معیارهای آزمایش مربوط به عملکرد سنگ‌دانه‌ها در ایجاد مقاومت لغزشی مطلوب در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: مقاومت لغزشی، روسازی، آسفالت، سنگ‌دانه، حدود مشخصات

### ۱- مقدمه

لغزشی سطح روسازی را می‌توان به چهار گروه دسته‌بندی کرد که عبارتند از: ویژگی‌های سطح روسازی، پارامترهای مربوط به عملکرد وسیله نقلیه، خصوصیات لاستیک و عوامل محیطی. جدول ۱ جزئیات بیشتری از پارامترهای مربوط به هر دسته را ارائه می‌کند. به دلیل آنکه هر عامل مندرج در این جدول در تعیین مقاومت لغزشی روسازی نقش ایفا می‌کند؛ بنابراین، مقاومت لغزشی باید به عنوان یک پارامتر چندعاملی در نظر گرفته شود و نباید صرفاً یک ویژگی ذاتی روسازی تلقی شود. فقط هنگامی که همه این عوامل به‌طور کامل مشخص شدند، مقدار قطعی مقاومت لغزشی قابل تعیین خواهد بود (Hall et al., 2009). در بین این عوامل، پارامترهایی که توسط متولیان امور ساخت و نگهداری راه (ادارات راه) باید کنترل شود

بررسی‌ها نشان می‌دهد تعداد قابل ملاحظه‌ای از تصادفات در فصول بارندگی اتفاق می‌افتد. با توجه به آنکه در حالت کلی، رطوبت باعث کاهش مقاومت لغزشی روسازی می‌شود؛ بنابراین، در طراحی و اجرای مخلوط‌های آسفالتی باید اجزای مخلوط آسفالتی از جمله سنگ‌دانه‌های آن به‌نحوی انتخاب شود که مقاومت لغزشی مخلوط آسفالتی به‌ویژه در شرایط مرطوب از مقدار مناسبی برخوردار باشد. شایان ذکر است مقاومت لغزشی روسازی از جمله موضوعات مهم در حوزه ایمنی و روسازی محسوب می‌شود که از دیرباز تا کنون بسیاری از محققان به آن پرداخته‌اند؛ با این وجود نگرش کلی مقاله حاضر عمدتاً مربوط به بررسی گزارش‌های تحقیقاتی و ضوابط بین‌المللی در این حوزه بوده است. عوامل مؤثر بر مقاومت

سنگ‌دانه‌ها معمولاً به دو گروه کلی ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها تقسیم می‌شوند. درشت‌دانه‌ها، سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر (مانند روی الک شماره ۴) هستند که اغلب اندازه‌های بین ۹/۵ تا ۳۸ میلی‌متر دارند. ریزدانه‌ها نیز مجموعه‌ای از دانه‌های طبیعی یا خردشده با اندازه کوچک‌تر از ۴/۷۵ و بزرگ‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (مانند روی الک شماره ۲۰۰) هستند (MS-2, 2014). در مخلوط‌های آسفالتی معمولاً بخش درشت‌دانه خصوصیات مقاومت لغزشی را کنترل می‌کند؛ در این ارتباط مخلوط‌های آسفالتی ریزدانه (که ریزدانه‌ها بخش عمده آن را تشکیل می‌دهند) استثنا محسوب می‌شوند (AASHTO 2008, Hall et al., 2009). تحقیقات نشان می‌دهد خصوصیات از سنگ‌دانه‌ها که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد مقاومت لغزشی روسازی دارند، عبارتند از: (AASHTO 2008, Hall et al., 2009).

- سختی<sup>۶</sup>؛

- نوع کانی<sup>۷</sup> (ترکیب و ساختار کانی)؛

- شکل؛

- بافت؛

- شکستگی<sup>۸</sup> (تیزگوشگی)؛

- مقاومت سایشی<sup>۹</sup>؛

- مقاومت در برابر صیقلی شدن<sup>۱۰</sup>؛

- سلامت (دوام) سنگ‌دانه<sup>۱۱</sup>.

سختی و نوع کانی سنگ‌دانه به‌نحو قابل ملاحظه‌ای بر خصوصیات مربوط به سایش (مانند دوام و صیقلی شدن) سنگ‌دانه تأثیرگذار است. سنگ‌دانه‌هایی که بالاترین سطح مقاومت لغزشی طولانی مدت را از خود نشان می‌دهند، معمولاً از بلورهای کانی سخت و به هم پیوسته (دانه درشت) که بین شبکه‌ای از کانی‌های نرم قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌شوند (Henry, 2000). تفاوت در اندازه دانه و سختی آن، باعث می‌شود به‌طور ثابت سطح سایشی جدیدی فراهم شود که این موضوع به دلیل نرخ متفاوت سایش دانه‌های سخت‌تر موجود در ماتریس نرم‌تر کانی‌های نرم‌تر است (AASHTO 2008, Hall et al., 2009). سنگ‌دانه‌هایی که صرفاً از کانی‌های سخت تشکیل شده‌اند (سختی موس<sup>۱۲</sup> بزرگتر از ۶)، به‌طور معمول در برابر سایش و دیگر شکل‌های تخریب مقاومت می‌کنند؛ با این وجود ممکن است هنگامی که در معرض عبور وسایل نقلیه قرار بگیرند، به راحتی صیقلی شوند. شایان ذکر است سختی موس، مقاومتی است که کانی در برابر خراشاندن، ساییدن یا

عبارتند از: بافت ریز<sup>۱</sup> و بافت درشت<sup>۲</sup>، خصوصیات مصالح روسازی و سرعت لغزش. بافت ریز که دارای طول موج کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و دامنه ۱ تا ۵۰۰ میکرومتر است (Sandberg, 1997)، نامنظمی‌های سطح سنگ‌دانه در مقیاس میکروسکوپی یا غیر قابل رؤیت را شامل می‌شود. این بافت تابعی از خصوصیات سطح سنگ‌دانه‌های موجود در مخلوط آسفالتی است. بافت درشت نیز که دارای طول موج ۰/۵ تا ۵۰ میلی‌متر و دامنه ۰/۱ تا ۲۰ میلی‌متر است، نامنظمی‌های سطح را که توسط خصوصیات مخلوط آسفالتی (شکل، اندازه و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها) مشخص می‌شود، شامل می‌گردد.

جدول ۱. عوامل مؤثر بر مقاومت لغزشی سطح روسازی

(AASHTO, 2008; Hall et al., 2009)

ویژگی‌های سطح روسازی	عوامل مربوط به عملکرد وسیله نقلیه	خصوصیات لاستیک	عوامل محیطی
- بافت ریز - بافت درشت - بافت خیلی درشت (کلی) <sup>۴</sup> - ناترازی <sup>۵</sup> - خصوصیات مصالح - دما	- سرعت لغزش (سرعت وسیله نقلیه، ترمزگیری) - مانور وسیله نقلیه (گردش، سبقت)	- رد لاستیک <sup>۳</sup> - طرح و شرایط آج - ترکیب و سختی لاستیک - فشار باد لاستیک - بار - دما	- آب و هوا (باد، دما، آب باران، شبنم و برف و یخ) - آلاینده‌ها (مواد ضدلغزش (نمک و شن) و گِل و لای، خار و خاشاک)

## ۲- ملاحظات مربوط به انتخاب نوع سنگ‌دانه

### مناسب در طراحی مقاومت لغزشی رویه

#### آسفالتی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، بافت ریز نقش کلیدی در ایجاد نیروهای اصطکاکی بین روسازی و لاستیک دارد و در درجه اول تابع خصوصیات سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی رویه است. با وجود آنکه که قیر در رویه آسفالتی می‌تواند روی بافت درشت تأثیر گذار باشد (به‌ویژه بلافاصله بعد از پخش و تراکم مخلوط)، این سنگ‌دانه است که جسم مخلوط‌های آسفالتی را تشکیل می‌دهد و به‌عنوان اولین محیط تماس با چرخ‌های وسیله نقلیه وارد عمل می‌شود.

همان‌طور که در جدول (۲) به‌طور خلاصه نشان شده است، شکستگی، بافت و شکل سنگ‌دانه عوامل مهمی در تعریف بافت ریز و درشت هستند. ریزدانه‌هایی که لبه‌های زاویه‌دار و شکل مکعبی یا نامنظم دارند، سطح بالاتری از بافت ریز را ایجاد می‌کنند؛ در حالی که سنگ‌دانه‌های ریز با لبه‌های گرد و شکل کشیده<sup>۱۳</sup> (دراز)، معمولاً سطح کمتری از بافت ریز را به‌وجود می‌آورند (Hall et al, 2009).

جدول ۲. تأثیر شکستگی، شکل و بافت سنگ‌دانه بر مقاومت

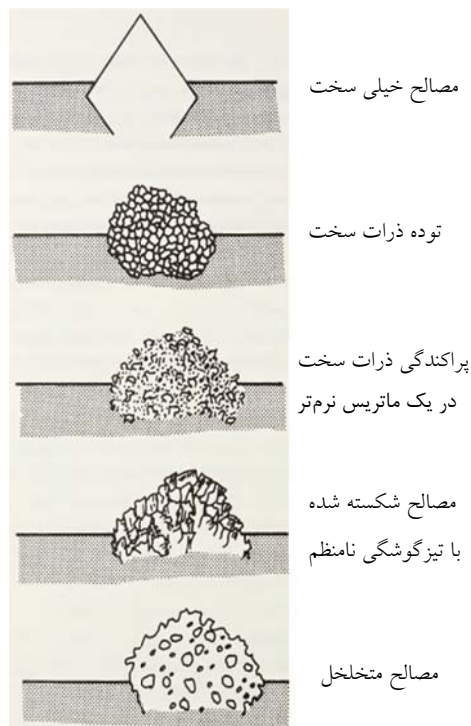
لغزشی روسازی آسفالتی (Hall et al., 2009)

گروه سنگ‌دانه	خصوصیات سنگ‌دانه	تأثیر خصوصیات سنگ‌دانه بر مقاومت لغزشی روسازی آسفالتی
ریزدانه	شکستگی (تیز گوشگی) و شکل	بی‌تأثیر
	بافت	بی‌تأثیر
درشت‌دانه	شکستگی (تیز گوشگی) و شکل	بافت درشت روسازی را تعریف می‌کند که بر مقاومت لغزشی از طریق پتانسیل آب‌گریزی تأثیر دارد.
	بافت	بافت ریز روسازی را تعریف می‌کند که به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت لغزشی تأثیرگذار است.

در سنگ‌دانه‌های درشت، دانه‌های تیز گوشه و شکسته شده نسبت به دانه‌های گرد گوشه، قفل و بست بیشتری دارند و بافت درشت عمیق‌تری ایجاد می‌کنند؛ علاوه بر این در مخلوط‌های آسفالتی، سنگ‌دانه‌های پهن و دراز<sup>۱۴</sup> تمایل دارند در جهت افقی تغییر جهت دهند که این موضوع منجر به به عمق کمتر در بافت درشت می‌شود.

مقاومت سایشی سنگ‌دانه‌ها معیاری است برای مقاومت آن‌ها در برابر سایش برای جلوگیری از خرد شدن سنگ‌دانه‌های ریز و یا درشت از اهمیت زیادی برخوردار است. خرد شدن ریزدانه‌ها یا درشت‌دانه‌ها در طی عملیات حمل، انبار کردن، اختلاط و اجرا می‌تواند به طور قابل توجهی دانه‌بندی مخلوط را تغییر دهد و در نتیجه روی تخلخل مخلوط‌های آسفالتی لایه اصطکاکی با دانه‌بندی باز<sup>۱۵</sup> تأثیر بگذارد. در مخلوط‌های آسفالتی افزایش ریزدانه می‌تواند خصوصیات حجمی را تغییر دهد و باعث قیر ناکافی و یا منجر به پدیده شیارشدگی و شن‌زدگی شود. بعد از اجرا نیز خرد شدن ریزدانه و یا درشت‌دانه در اثر نیروی برشی حاصل از بار ترافیکی می‌تواند افت بافت درشت را به‌همراه داشته باشد.

خرائیده شدن از خود نشان می‌دهد. برای تعیین سختی کانی‌ها کافی است که هر کانی توسط کانی دیگر خراش داده شود تا سختی نسبی آن دو معلوم شود. برای اینکه تعیین سختی کانی‌ها حالتی یکنواخت پیدا کند، فردریک موس، کانی‌شناس آلمانی، ۱۰ کانی را که به طور متوالی هر یک سخت‌تر از نمونه قبلی است، انتخاب نمود. این ۱۰ کانی که به «مقیاس سختی موس» معروفند به صورتی گسترده برای تعیین سختی کانی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنگ‌دانه‌هایی که تنها از کانی‌های نسبتاً نرم (سختی موس بین ۳ تا ۶) تشکیل شده‌اند نیز در برابر صیقلی شدن مقاومت می‌کنند؛ ولی هنگامی که در معرض عبور وسایل نقلیه قرار می‌گیرند، به سرعت ساییده می‌شوند (AASHTO 2008, Hall et al., 2009). در عمل معمولاً سنگ‌دانه‌های درشت که شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد کانی‌های درشت و سخت که در درون ماتریسی از ۳۰ تا ۵۰ درصد کانی‌های نرم‌تر باشند، سنگ‌دانه‌های درشت ایده‌آل محسوب می‌شوند (AASHTO, 2008). شکل (۱) مدل‌های نظری مختلف سنگ‌دانه مقاوم در برابر صیقلی شدن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل‌های نظری مختلف سنگ‌دانه مقاوم در برابر

صیقلی شدن (Dahir and Henry, 1978)

- درصد شکستگی سنگدانه (ASTM D5821)؛  
 - آزمایش میکرو دوال برای ریزدانه<sup>۱۷</sup> (A23.2-23A [CSA<sup>۱۸</sup>])؛  
 - آزمایش میکرو دوال برای درشتدانه (ASTM D6928)؛  
 - آزمایش سایش به روش لوس آنجلس (AASHTO T96) یا  
 ASTM C131 برای درشتدانه با اندازه کوچک؛  
 - باقیمانده نامحلول در اسید<sup>۱۹</sup> (ASTM D3042)؛  
 - آزمایش شاخص صیقلی شدن سنگدانه<sup>۲۰</sup> (PSV) (AASHTO T279 و ASTM E303 یا AASHTO T278 و ASTM D3319، BS EN 1097-8 و استاندارد ملی ایران با شماره ۸-۱۴۸۷۴ (این استاندارد برگرفته از استاندارد BS EN1097-8 است))؛  
 - آزمایش سلامت (دوام) سنگدانه در برابر سولفات منیزیم (افت وزنی با سولفات منیزیم) (ASTM T104 یا AASHTO C88). جدول (۳) شرح مختصری از این آزمایش‌ها را ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است هیچ آزمایشی به تنهایی پیش‌بینی دقیق و کاملی از عملکرد مقاومت لغزشی ارائه نمی‌دهد (Hall et al., 2009). همچنین بین نتایج حاصل از آزمایش‌ها همیشه نمی‌توان همبستگی مناسبی را مشاهده کرد. به عنوان مثال همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، همبستگی مناسبی بین PSV و سایر نتایج آزمایش‌های مرتبط به سنگدانه مشاهده نمی‌شود (Woodside et al., 1998). اگرچه انتخاب و استفاده از چند آزمایش، قابلیت اطمینان در این مورد را افزایش می‌دهد؛ ولی هیچ تضمینی برای پیش‌بینی دقیق عملکرد مقاومت لغزشی در میدان وجود ندارد؛ بنابراین، برای شناسایی نوع سنگدانه قابل قبول، ضروری است از انجام آزمایش در کنار بررسی تاریخچه عملکرد میدانی استفاده شود.

سنگدانه‌های مقاوم در برابر صیقلی شدن، به سنگدانه‌هایی گفته می‌شود که در اثر نیروی برشی ناشی از بارهای ترافیکی مکرر، بافت ریز خود را حفظ کنند. سختی و نوع کانی سنگدانه‌های درشت تعیین‌کننده میزان صیقلی شدن است. سلامت سنگدانه معرف قابلیت مقاومت سنگدانه در برابر تخریب‌های ناشی از اثرات جوی و آب و هوایی (مانند مرطوب و خشک کردن و انجماد و ذوب) است. مشابه مقاومت در برابر سایش، ویژگی‌های سلامت و دوام سنگدانه برای جلوگیری از خورد شدن ریزدانه و یا درشتدانه به‌ویژه هنگامی که در آب و هوای ناملایم<sup>۱۶</sup> استفاده شوند، از اهمیت زیادی برخوردار است. در آزمایش تعیین سلامت سنگدانه می‌توان از سولفات سدیم یا سولفات منیزیم استفاده کرد؛ با این حال به علت آنکه سولفات منیزیم منجر به تغییرات کمتری در نتایج افت وزنی می‌شود، استفاده از سولفات منیزیم ترجیح داده می‌شود (Khandal and Parker, 1998).

### ۳- آزمایش‌های ارزیابی سنگدانه برای ایجاد مقاومت لغزشی مناسب در مخلوط آسفالتی

برای ایجاد مقاومت لغزشی مناسب در مخلوط آسفالتی، ارزیابی سنگدانه مورد استفاده در مخلوط آسفالتی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. آزمایش‌هایی که در تعیین ویژگی‌های مربوط به مقاومت لغزشی سنگدانه‌ها مؤثر هستند عبارتند از:  
 - سختی در برابر خراش (Mohs)؛  
 - تحلیل پتروگرافی (سنگ‌نگاری) (ASTM C295)؛  
 - درصد فضای خالی ریزدانه نامتراکم (AASHTO T304 یا ASTM C1252)؛  
 - درصد فضای خالی درشتدانه (AASHTO T326)؛

جدول ۳. روش‌های آزمایش برای تعیین خصوصیات مقاومت لغزشی سنگدانه (AASHTO 2008, Hall et al., 2009)

کاربرد	شرح مختصر آزمایش	استاندارد آزمایش	نام آزمایش	نوع سنگدانه	خصوصیت سنگدانه
سطوح بتنی جدید	اندازه‌گیری تقریبی مقاومت سطح یک کانی در برابر خراشیدن. سختی Mohs با مشاهده خراشیده شدن سطح یک کانی توسط کانی با سختی مشخص در مقیاس ۱ تا ۱۰ (۱ بسیار نرم، ۱۰ بسیار سخت)، تعیین می‌شود.	Mohs	آزمایش سختی در برابر خراش	ریزدانه	سختی
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می‌شوند. - سطوح بتنی جدید	همانند بالا	Mohs	آزمایش سختی در برابر خراش	درشتدانه	

کاربرد	شرح مختصر آزمایش	استاندارد آزمایش	نام آزمایش	نوع سنگدانه	خصوصیت سنگدانه
سطوح بتنی جدید	توصیف مختصری از سنگدانه های طبیعی یا مصنوعی حاصل از سنگ دانه های معدنی را ارائه می دهد. این توصیفات مبنایی برای درک تأثیرات احتمالی بر مقاومت لغزشی روسازی هنگام استفاده از مصالح سنگی مختلف است.	ASTM C294	نام گذاری توصیفی برای مواد تشکیل دهنده سنگدانه های بتن	ریزدانه	کانی شناسی (ترکیب و ساختار سنگدانه)
	ارزیابی سنگدانه از نظر (۱) کانی تشکیل دهنده و ساختار آن، (۲) بافت سطحی و (۳) کانی شناسی و همچنین ایجاد یک پایگاه داده پتروگرافی برای منابع سنگدانه به عنوان مبنایی برای ارتباط منابع سنگدانه با عملکرد میدانی روسازی.	ASTM C295	آنالیزهای پتروگرافی (سنگ نگاری)		
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط های آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می شوند.	همانند بالا	ASTM C294	نام گذاری توصیفی برای مواد تشکیل دهنده سنگدانه های بتن	درشتدانه	
	همانند بالا	ASTM C295	آنالیزهای پتروگرافی (سنگ نگاری)		
سطوح بتنی جدید	سنگدانه های ریز با دانه بندی مشخص از دهانه قیف عبور داده شده و یک استوانه به حجم ۱۰۰ سانتی متر مکعب پر می شود. سنگدانه های اضافی کنار زده شده و وزن استوانه حاوی سنگدانه اندازه گیری می شود. درصد فضای خالی نامتراکم با استفاده از این وزن و وزن مخصوص خشک واقعی سنگدانه محاسبه می گردد. درصد فضای خالی نامتراکم بیشتر به طور کلی نتیجه شکستگی بیشتر وجوه و بافت های زبرتر است که برای مقاومت لغزشی روسازی مطلوب است.	AASHTO T304 یا ASTM C1252	آزمایش درصد فضای خالی ریزدانه نامتراکم	ریزدانه	
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می شوند.	شکستگی، شکل و بافت سنگدانه درشت را می توان با استفاده از اصولی مشابه آنچه که در بالا برای سنگدانه های ریز اشاره شد، تعیین کرد. در این حالت نیز درصد فضای خالی نامتراکم بیشتر به طور کلی نتیجه شکستگی بیشتر وجوه و بافت های زبرتر است که برای مقاومت لغزشی روسازی مطلوب است.	AASHTO T326	آزمایش درصد فضای خالی درشتدانه نامتراکم	درشتدانه	شکستگی، شکل و بافت
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می شوند.	مقدار (درصد) شکستگی وجوه سنگدانه (تیز گوشگی، زبری یا شکستگی سطح یک سنگدانه) با بررسی چشمی تعیین می شود. وجه شکسته شده هر سنگدانه باید یک حداقل سطح مقطع را برآورده نماید.	ASTM D5821	آزمایش درصد شکستگی		

کاربرد	شرح مختصر آزمایش	استاندارد آزمایش	نام آزمایش	نوع سنگدانه	خصوصیت سنگدانه
- سطوح بتنی جدید					
سطوح بتنی جدید	یک نمونه از سنگدانه ریز با قرار گرفتن در یک ظرف فولادی با گلوله‌های فولادی به قطر ۹/۵ میلی‌متر، در معرض سایش مرطوب قرار می‌گیرد. ظرف فولادی با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه می‌چرخد و پس از آن اضمحلال سنگدانه براساس افت جرم با استفاده از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) ارزیابی می‌شود. درصد افت جرم بیشتر معرف پتانسیل بیشتر خردشدن سنگدانه است.	انجمن استانداردهای کانادا (CSA) A23. 2-23A	آزمایش میکرو دوال ریزدانه	ریزدانه	
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط‌های آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می‌شود.	نمونه‌ای از سنگدانه خشک در استوانه فولادی حاوی ۶ تا ۱۲ گلوله فولادی ۴۲۰ گرمی قرار می‌گیرد و استوانه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ دور می‌چرخد. میزان افت سنگدانه‌ها براساس مصالح عبوری از الک شماره ۱۲ (۱/۷ میلی‌متر) تعیین می‌شود.	AASHTO T96 یا ASTM C131 برای درشت‌دانه با اندازه کوچک؛ ASTM C535 برای درشت‌دانه بزرگ	آزمایش سایش به روش لوس انجلس	درشت‌دانه	مقاومت سایشی
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط‌های آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می‌شود.	یک نمونه از سنگدانه درشت با قرار گرفتن در یک ظرف فولادی با گلوله‌های فولادی به قطر ۹/۵ میلی‌متر، در معرض سایش مرطوب قرار می‌گیرد. ظرف فولادی با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲ ساعت می‌چرخد و پس از آن اضمحلال سنگدانه براساس افت جرم براساس مصالح عبوری از الک شماره ۱۶ (۱/۱۸ میلی‌متر) ارزیابی می‌شود.	ASTM D6928 AASHTO T327	آزمایش میکرو دوال درشت‌دانه		
- سطوح بتنی جدید	در این آزمایش درصد وزنی رسوبات غیرکربناته نامحلول و سخت موجود در سنگدانه‌های کربناته (مانند سنگ آهک و دولومیت) تخمین زده می‌شود. برای انجام این آزمایش از محلول هیدروکلریک اسید برای واکنش دادن با کربنات‌ها استفاده می‌شود. هرچه مقدار رسوبات نامحلول در اسید بیشتر باشد، می‌توان نتیجه گرفت مقدار کانی‌های سیلیسی بیشتر است. سنگدانه‌های حاوی کانی سیلیس در مقایسه با سنگدانه‌های کربناته از مقاومت بیشتری در برابر صیقلی شدن برخوردار هستند.	ASTM D3042	آزمایش باقیمانده نامحلول در اسید	ریزدانه	مقاومت در برابر صیقلی شدن
- سطوح جدید آسفالتی و مخلوط آسفالتی که برای ارتقاء مقاومت لغزشی استفاده می‌شود.	قطعات سنگدانه‌ای (سنگدانه‌های جاسازی شده در رزین اپوکسی) ساخته شده، برای مدت زمان مشخصی (معمولاً ۱۰ ساعت براساس استانداردهای AASHTO و ASTM و ۶ ساعت براساس استاندارد BS EN) در معرض صیقلی شدن سریع (با استفاده از چرخ صیقل انگلیسی) قرار می‌گیرند؛ سپس با استفاده از آزمایش آونگ انگلیسی، مقاومت اصطکاکی برحسب عدد آونگ انگلیسی (BPN) اندازه‌گیری می‌شود. براساس	AASHTO T278 و AASHTO T279 یا ASTM E303 و ASTM D3319	آزمایش شاخص صیقلی شدن (PSV)	درشت‌دانه	

کاربرد	شرح مختصر آزمایش	استاندارد آزمایش	نام آزمایش	نوع سنگدانه	خصوصیت سنگدانه
- سطوح بتنی جدید	استانداردهای ASTM و AASHTO، BPN مربوط به نمونه بعد از فرآیند صیقلی شدن تسریع یافته، به عنوان شاخص صیقلی شدن (PSV) تعریف می شود؛ درحالی که براساس استاندارد BS EN 1097-8 مقدار PSV از رابطه $PSV=S+52.5-C$ محاسبه می شود که در آن S میانگین BPN مربوط به چهار نمونه از یک نوع سنگدانه بعد از فرآیند صیقلی شدن تسریع یافته و C میانگین BPN مربوط به چهار نمونه سنگ مرجع PSV است. PSV در واقع معرف ویژگی مقاومت لغزندگی نهایی سنگدانه است. هرچه PSV بیشتر باشد، مقاومت سنگدانه در برابر صیقلی شدن نیز بیشتر خواهد بود.	یا BS EN 1097-8 استاندارد ملی ایران با شماره ۱۴۸۷۴-۸ (که برگرفته از استاندارد BS EN 1097-8 است)			
- سطوح بتنی جدید - آسفالتی و مخلوطهای آسفالتی - مقاومت لغزشی - سطوح بتنی جدید	در این آزمایش درصد وزنی رسوبات غیرکربناته نامحلول و سخت موجود در سنگدانه های کربناته (مانند سنگ آهک و دولومیت) تخمین زده می شود. برای انجام این آزمایش از محلول هیدروکلریک اسید برای واکنش دادن با کربنات ها استفاده می شود. هرچه مقدار رسوبات نامحلول در اسید بیشتر باشد، می توان نتیجه گرفت مقدار کانی های سیلیسی بیشتر است. سنگدانه های حاوی کانی سیلیس در مقایسه با سنگدانه های کربناته از مقاومت بیشتری در برابر صیقلی شدن برخوردار هستند.	ASTM D3042	آزمایش باقیمانده نامحلول در اسید		
- سطوح بتنی جدید - سطوح بتنی و آسفالتی - مخلوطهای آسفالتی - مقاومت لغزشی - سطوح بتنی جدید	یک نمونه سنگدانه به مدت ۱۶ تا ۱۸ ساعت در دمای ۲۱ درجه سلسیوس در محلول سولفات منیزیم غوطه ور می شود. سپس نمونه را از محلول خارج کرده و به مدت ۱۵ دقیقه اجازه داده می شود تا محلول از آن خارج شود؛ در ادامه در یک گرم خانه تا رسیدن به وزن ثابت خشک می شود (۵ دوره غوطه وری و خشک شدن معمول است). در طی فرآیند غوطه وری، محلول نمک به منافذ نفوذپذیر سنگدانه نفوذ می کند. خشک شدن در گرم خانه باعث آبرگیری از نمک سولفات رسوب کرده در منافذ می شود. نیروی انبساط داخلی حاصل از آبرسانی (هیدراتاسیون) به محض غوطه وری مجدد، انبساط آب را هنگام انجماد شبیه سازی می کند. پس از اتمام چرخه نهایی، نمونه روی الک های مختلف الک می شود و حداکثر افت متوسط وزنی به عنوان افت سلامت در برابر سولفات گزارش می شود. درصد بالاتر افت وزنی، نشان دهنده سلامت یا دوام کمتر سنگدانه است.	AASHTO یا T104 ASTM C88	آزمایش سلامت (دوام) با استفاده از سولفات منیزیم	ریزدانه	سلامت (دوام)

جدول ۴. ارتباط بین PSV و تعدادی دیگر از نتایج آزمایش سنگدانه (Woodside et al., 1998)

متغیرها	تعداد نمونه	رابطه به دست آمده	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )
PSV, WA	۴۴	$PSV=4.43WA+54.90$	۰/۲۴
PSV, AIV	۴۶	$PSV=0.23AIV+56.02$	۰/۰۷
PSV, TFV	۲۸	$PSV=-0.03TFV+70.13$	۰/۲۲
PSV, MSSV	۲۸	$PSV=-0.10MSSV+68.21$	۰/۰۵
PSV, AAV	۳۸	$PSV=1.08AAV+53.23$	۰/۳۴
PSV, MDE	۳۵	$PSV=0.30MDE+53.35$	۰/۴۶

PSV=Polished Stone Value; WA=Water Absorption; AIV= Aggregate Impact Value; TFV= Ten Percent Fines Value (BS 812 Part 111); MSSV=Magnesium Sulphate Value; AAV= Aggregate Abrasion Value; MDE= Micro-Deval

جدول ۵. محدوده متداول برای مقادیر حاصل از آزمایش خصوصیات سنگ‌دانه (AASHTO 2008; Hall et al., 2009) [برای تکمیل این جدول از مراجع (TEX-438-A, 2014; MDOT-MSMT 216, 2012; MDOT, 2020; ASTM D1073, 2016; ASTM D692, 2015; FP-14, 2014)] استفاده شده است.

توضیحات	محدوده متداول برای عملکرد مقاومت لغزشی خوب	نوع آزمایش	نوع سنگ‌دانه	خصوصیت سنگ‌دانه	
<p>- سختی موس برای کانی‌های متفاوت به شرح زیر است:</p> <p>الماس: ۱۰ فلدسپار: ۶-۷/۵ یاقوت: ۹ گروه پیروکسین: ۵-۷ توپاز: ۸ گروه آمفوبول: ۴-۶/۵ سیلیمانیت: ۷/۵ آپاتیت: ۵ کوردیریت: ۷-۷/۵ کوارتز: ۷ گروه گرانیت: ۶/۵-۷/۵ الیون (Olivine): ۶/۵-۷ گروه اپیدت (Epidote): ۶-۷ کلسیت: ۳ سنگ گچ (Gypsum): ۲ کلسدون (Chalcedony): ۶</p> <p>- معمولاً سختی موس برابر ۵ به‌عنوان مرز بین کانی سخت و نرم در نظر گرفته می‌شود.</p> <p>- سنگ‌دانه‌های تشکیل‌شده از کانی‌های سخت (سختی موس بیشتر از ۶) به‌تنهایی دارای مقاومت خوبی در برابر سایش و دیگر شکل‌های تخریب هستند؛ ولی هنوز ممکن است در معرض ترافیک، به راحتی صیقلی شوند. سنگ‌دانه‌های تشکیل‌شده از کانی‌های نسبتاً نرم (سختی موس بین ۳ تا ۶) به‌تنهایی در برابر صیقلی شدن مقاومت می‌کنند؛ ولی در معرض ترافیک ممکن است به سرعت ساییده شوند.</p> <p>- سنگ‌دانه‌های درشت که شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد کانی‌های درشت‌دانه و سخت که در درون ماتریسی از ۳۰ تا ۵۰ درصد کانی‌های نرم‌تر باشند، سنگ‌دانه‌های درشت ایده‌آل محسوب می‌شوند. سنگ‌دانه‌های درشتی که شامل کانی‌ها یا بلورهای بزرگ‌تر و تیز گوشه هستند، بافت ریزتری به نمایش می‌گذارند و مقاومت لغزشی بیشتری دارند.</p>	<p><math>6 \leq</math></p>	سختی موس	ریزدانه	سختی	
	<p>کانی‌های سخت: <math>6 \leq</math> کانی‌های نرم: ۳-۵ سختی تفاضلی (سخت منهای نرم): ۲-۳</p>	سختی موس	درشت‌دانه		ترکیب و ساختار سنگ‌دانه
	<p>درصد قسمت سخت سنگ‌دانه‌های طبیعی: ۵۰ تا ۷۰ درصد سنگ‌دانه‌های مصنوعی: ۲۰ تا ۴۰ درصد</p> <p>اندازه دانه یا بلور <math>\frac{\text{سخت}}{\text{سخت}}</math> ۱۵۰ تا ۳۰۰ میکرومتر (متوسط ۲۰۰ میکرومتر)</p> <p>شکل دانه یا بلور <math>\frac{\text{سخت}}{\text{سخت}}</math> تیز گوشه</p>	بررسی چشمی (ترکیبات سنگ دانه‌های بتن) و آنالیز سنگ‌نگاری (پتروگرافی)	ریزدانه		
<p>مقدار حداقل ۴۵ درصد صرفاً مبتنی بر معیار شیار افتادگی جای چرخ است. تحقیقی که نشان دهد از دیدگاه مقاومت لغزشی حداقل درصد فضای خالی نامتراکم برای درشت‌دانه یا ریزدانه چقدر است، مشاهده نشد.</p>	<p><math>45 \leq</math></p> <p><math>45 \leq</math></p>	درصد فضای خالی نامتراکم	ریزدانه	شکستگی، شکل و بافت	
<p>مقدار حداقل ۹۰ درصد براساس معیار شیار افتادگی جای چرخ است. برای روسازی راه‌های با ترافیک زیاد بهتر است حداقل میزان شکستگی در دو یا چند وجه ۹۵ درصد باشد. تحقیقی که نشان دهد از دیدگاه مقاومت لغزشی حداقل درصد شکستگی چقدر است، مشاهده نشد.</p>	<p>اندازه ذرات سنگ‌دانه: ۳ تا ۱۳ میلی‌متر شکل ذرات سنگ‌دانه: مخروطی، گوشه‌دار. حداقل ۹۰ درصد از</p>	شکستگی وجوه دانه‌ها	درشت‌دانه		

توضیحات	محدوده متداول برای عملکرد مقاومت لغزشی خوب	نوع آزمایش	نوع سنگدانه	خصوصیت سنگدانه
	وزن مخلوط سنگ دانه‌های مانده روی الک شماره ۴ (۷۵/۴ میلی‌متر) باید در عملیات سنگ‌شکن، دارای دو یا چند وجه شکسته باشند.			
توصیه شده است حداکثر مقدار مجاز افت وزنی، ۱۸ درصد باشد (Kandhal and Parker, 1998). در ایالت انتاریو حداکثر مقدار افت وزنی در این آزمایش برای سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در لایه رویه ۱۷ درصد در نظر گرفته می‌شود (Kandhal and Parker, 1998).	$\geq 17$ تا ۲۰	درصد افت وزنی در آزمایش میکرودوال	ریزدانه	مقاومت سایشی
	$\geq 17$ تا ۲۰	درصد افت وزنی در آزمایش میکرودوال	درشت‌دانه	
<p>- آزمایش سایش به روش لوس آنجلس به‌طور گسترده در ادارات راه ایالات مختلف آمریکا استفاده می‌شود که مقدار حداکثر آن بین ۳۰ تا ۵۵ درصد و عمدتاً حداکثر ۴۰ درصد را در نظر می‌گیرند.</p> <p>- Wu و همکارانش (۱۹۹۸) مقدار حداکثر سایش مصالح سنگی به روش لوس آنجلس را در بیشتر ایالات آمریکا ۴۰ تا ۴۵ درصد عنوان کرده‌اند و در این ارتباط اظهار داشته‌اند که این حدود بیشتر برای سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در لایه رویه است تا لایه اساس.</p> <p>- FHWA (۲۰۰۵) پیشنهاد می‌کند حداکثر سایش سنگ‌دانه‌ها به روش لوس آنجلس ۳۵ تا ۴۵ درصد باشد.</p> <p>- درخصوص حداکثر میزان درصد سایش به روش لوس آنجلس برای سنگ دانه‌های مورد استفاده در رویه آسفالتی، به مطالب تکمیلی که در ادامه مراجع مختلف از جمله (FP-14, 2014)، (ASTM D1073, 2016) و (ASTM D692, 2015) ارائه شده، مراجعه شود.</p>	$\geq 35$ تا ۴۵	درصد سایش به روش لوس آنجلس		
<p>- Dahir و Henry (۱۹۷۸) برای روسازی‌های با ترافیک زیاد، این مقدار را حداقل ۵۰ تا ۷۰ درصد توصیه می‌کنند.</p> <p>- در اداره حمل و نقل کنتاکی (آمریکا) برای سنگ‌دانه‌های طبقه A، این مقدار حداقل ۵۰ درصد است (Liang, 2003).</p> <p>- در اداره حمل و نقل نیویورک (آمریکا) برای ترافیک متوسط روزانه (ADT) بیشتر از ۳۰۰۰ وسیله نقلیه در روز، این مقدار حداقل ۱۵ درصد است (Liang and Chyi, 2000).</p>	$\leq 50$ تا ۷۰	باقی مانده نامحلول در اسید (AIR) %	ریزدانه	مقاومت در برابر صیقلی‌شدن
	$\leq 50$ تا ۷۰	باقی مانده نامحلول در اسید (AIR) %	درشت‌دانه	
<p>- معیارهای اداره حمل و نقل تگزاس (آمریکا) برای PSV براساس سطوح ترافیک مختلف به‌صورت زیر است (Liang and Chyi, 2000). براساس استاندارد در این ایالت، مدت زمان سایش سنگ‌دانه‌ها برابر ۹ ساعت است (TEX-438-A, 2014):</p> <p>ADT &lt; ۷۵۰: لزومی ندارد.</p>	$\leq 30$ تا ۳۵	شاخص صیقلی شدن سنگ‌دانه (PSV)		

توضیحات	محدوده متداول برای عملکرد مقاومت لغزشی خوب	نوع آزمایش	نوع سنگ‌دانه	خصوصیت سنگ‌دانه
<p>۲۸ &lt; ADT ≤ ۷۵۰: حداقل</p> <p>۳۰ &lt; ADT ≤ ۲۰۰۰: حداقل</p> <p>ADT &gt; ۵۰۰۰: حداقل ۳۲</p> <p>- اداره حمل و نقل لوئیزیانا (آمریکا) برای PSV سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی ۴ سطح زیر را الزام کرده است (Liang, 2003):                      طبقه I مقاومت لغزشی (کاربرد برای همه مخلوط‌های آسفالتی): <math>PSV &gt; 37</math>                      طبقه II مقاومت لغزشی (کاربرد برای همه مخلوط‌های آسفالتی):  <math>35 \leq PSV \leq 37</math>                      طبقه III مقاومت لغزشی (کاربرد برای همه مخلوط‌های آسفالتی به جز برای لایه رویه در حالت <math>ADT &gt; 7000</math>): <math>24 \leq PSV \leq 30</math>                      طبقه IV مقاومت لغزشی (کاربرد برای همه مخلوط‌های آسفالتی به جز لایه رویه): <math>20 \leq PSV \leq 29</math></p> <p>- اداره حمل و نقل نیوجرسی (آمریکا) PSV درشت‌دانه مورد استفاده در لایه رویه را حداقل ۲۰ تا ۳۰ معرفی می‌کند و سنگ‌دانه‌های با PSV بزرگ‌تر از ۳۰ به‌عنوان سنگ‌دانه‌های خوب در نظر گرفته می‌شوند (Liang, 2003). در این ایالت به‌منظور اطمینان از اینکه مقدار SN40S بزرگ‌تر از ۳۵ باشد، حداقل PSV سنگ‌دانه را ۳۳ توصیه می‌کند (Liang, 2003).</p> <p>- اداره حمل و نقل تنسی (آمریکا) سنگ‌دانه‌ها را براساس درصد سیلیسیم دی‌اکسید (<math>SiO_2</math>)، درصد کلسیم کربنات (<math>CaCO_3</math>)، باقیمانده نامحلول در اسید (AIR) و PSV سنگ‌دانه‌ها را طبقه‌بندی می‌کند. حداقل PSV برای هر طبقه عبارتند از (Liang, 2003):                      نوع I: ۳۳                      نوع II: ۳۰                      نوع III: ۲۵</p> <p>- اداره حمل و نقل یوتا (آمریکا)، PSV سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی رویه را حداقل ۳۸ مشخص می‌کند (Liang, 2003).</p> <p>- اداره حمل و نقل ایالت مریلند (آمریکا)، از مقدار مقاومت لغزشی دینامیکی (DFV) حاصل از آزمایش مطابق مندرجات (MDOT-MSMT 216, 2012)، به‌عنوان شاخص صیقلی شدن سنگ‌دانه استفاده می‌کند. برای انجام این آزمایش ابتدا سنگ‌دانه‌ها مطابق مشخصات مندرج در استاندارد (MDOT-MSMT 215, 2012) در معرض سایش قرار می‌گیرند و در ادامه با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت لغزشی دینامیکی (DFT)، مقدار مقاومت لغزشی دینامیکی (DFV) سنگ‌دانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. براساس مشخصات استاندارد برای ساخت و مصالح در این ایالت (MDOT, 2020)، حداقل مقدار DFV برای</p>				

توضیحات	محدوده متداول برای عملکرد مقاومت لغزشی خوب	نوع آزمایش	نوع سنگدانه	خصوصیت سنگدانه
<p>سنگدانه‌های مورد استفاده رویه آسفالتی برابر ۲۵ و حداقل مقدار این شاخص برای سنگدانه‌های مورد استفاده در رویه آسفالتی با اصطکاک زیاد، آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، آسفالت متخلخل، اسلاری سیل و میکروسرفیسینگ، برابر ۴۰ ضروری است. تحقیقات انجام شده توسط Nataadmadja و همکارانش (۲۰۱۵) نشان می‌دهد بین DFV و PSV می‌توان رابطه زیر را در نظر گرفت (Nataadmadja et al., 2015). لازم به ذکر است که در این تحقیق آزمایش PSV مطابق استاندارد EN BS 1098-8 انجام شده است.</p> $DFT(DFV/100)=0.0102 \times PSV - 0.1256 \quad R^2=0.98$ <p>بر اساس رابطه فوق، می‌توان گفت در ایالت مریلند، حداقل مقدار PSV لازم برای سنگدانه‌های مورد استفاده در رویه آسفالتی باید برابر ۳۷ و حداقل مقدار این شاخص برای سنگدانه‌های مورد استفاده در رویه آسفالتی با اصطکاک زیاد، آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، آسفالت متخلخل، اسلاری سیل و میکروسرفیسینگ باید برابر ۵۲ باشد.</p> <p>– Senior و Rogers (۱۹۹۱) حداقل PSV سنگدانه‌ها برای استفاده در راه‌های با ترافیک زیاد را حداقل ۵۰ توصیه می‌کنند.</p> <p>– حداقل مقدار PSV سنگدانه‌های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی رویه راه‌ها در کشورهای فرانسه، انگلستان و اسپانیا در جداولی که در ادامه آمده است، ارائه شده است.</p>				
<p>– با وجود آنکه Kandhal و همکارانش (۱۹۹۷) عنوان کردند که در برخی از ایالات آمریکا دامنه نسبتاً وسیعی (۱۰ تا ۳۰) برای حداکثر درصد افت وزنی مشخص شده است؛ ولی تحقیقات بعدی که در قالب NCHRP Project 4 19 انجام شد، نشان داد که حداکثر افت وزنی باید ۱۸ درصد در نظر گرفته شود (Kandhal and Parker, 1998).</p> <p>FHWA (۲۰۰۵)، حداکثر افت وزنی در برابر محلول سولفات منیزیم را در محدوده ۱۵ تا ۲۰ درصد توصیه می‌کند.</p> <p>– در خصوص حداکثر میزان درصد افت وزنی در برابر سولفات منیزیم برای سنگدانه‌های مورد استفاده در رویه آسفالتی، به مطالب تکمیلی که در ادامه مراجع مختلف از جمله (FP-14, 2014)، (ASTM D1073, 2016) و (ASTM D692, 2015) ارائه شده، مراجعه شود.</p>	<p><math>\geq 10</math> تا ۲۰</p>	<p>درصد افت وزنی در برابر سولفات منیزیم (۵ چرخه)</p>	<p>ریزدانه</p>	سلامت
	<p><math>\geq 10</math> تا ۲۰</p>	<p>درصد افت وزنی در برابر سولفات منیزیم (۵ چرخه)</p>	<p>درشت‌دانه</p>	

#### ۴- معیارهای آزمایش سنگدانه

مشکل است؛ با این وجود، مقادیر پیشنهادی حاصل از تحقیقات و تجارب موجود را می‌توان به عنوان راهنمای اولیه در تعیین معیارهای آزمایش مربوط به عملکرد مقاومت لغزشی در نظر گرفت. جدول ۵ مقادیر راهنما را به صورت محدوده‌های قابل قبول برای هر یک از آزمایش‌ها، نشان می‌دهد. این مقادیر مربوط به سنگدانه‌های اصلی (اولیه) است

همان‌طور که با هیچ آزمایشی به تنهایی نمی‌توان عملکرد مقاومت لغزشی خوب را از بد تشخیص داد، هیچ مقدار مشخص و استاندارد را نیز نمی‌توان برای این منظور معرفی کرد. عواملی که بر عملکرد مقاومت لغزشی تأثیر می‌گذارند، در تعامل با یکدیگر و در مقیاس پیوسته این کار را انجام می‌دهند؛ در نتیجه تعیین مقادیر مشخص برای این منظور

مختلف آمریکا هستند؛ البته این نکته را باید در نظر داشت که مدت زمان صیقلی شدن سنگ‌دانه‌ها براساس استانداردهای ASTM D3319 و AAHTO T279 برابر ۱۰ ساعت و در استاندارد BS EN 1097-8 این زمان برابر ۳ یا ۶ ساعت است؛ بنابراین، یکی از دلایل تفاوت بین سطوح آستانه PSV در کشورهای اروپایی و ایالات مختلف آمریکا، مدت زمان سایش سنگ‌دانه‌ها است. شکل (۲) تغییرات PSV ۴ نوع سنگ‌دانه را بر حسب مدت (تعداد دور) صیقلی شدن نشان می‌دهد (Guan et al., 2018). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد دور صیقلی شدن، مقدار PSV سنگ‌دانه کاهش می‌یابد؛ به طوری که این کاهش در ابتدا با شیب تند، سپس با شیب ملایم و در انتها (تقریباً بعد از ۱۰ ساعت صیقلی شدن) به حالت تثبیت شده درمی‌آید. در این مطالعات سرعت چرخ حاوی نمونه‌های سنگ‌دانه، برابر  $320 \pm 5$  دور در دقیقه بوده است (Guan et al., 2018). بررسی این شکل نشان می‌دهد که نسبت PSV پس از ۱۰ ساعت صیقلی شدن به PSV پس از ۶ ساعت صیقلی شدن، بین ۸۸ درصد تا ۹۷ درصد (به‌طور متوسط ۹۲ درصد) تغییر می‌کند. در مواردی که سنگ‌دانه‌ها الزامات مربوط به مقاومت لغزشی را برآورده نمی‌کنند، از جمله روش‌های بهبود مقاومت لغزشی مخلوط‌های آسفالتی، مخلوط کردن این سنگ‌دانه‌ها با دانه‌های با سختی بیشتر مانند سنگ‌دانه‌های با درصد سیلیس زیاد، سرباره‌های فولاد<sup>۲۱</sup> (Ji et al., 2023) یا بوکسیت کلسینه<sup>۲۲</sup> (Li and Liu, 2023) است. میزان و نحوه مصرف این مصالح برای بهبود مقاومت لغزشی مخلوط آسفالتی باید به‌گونه‌ای باشد که الزامات طراحی و اجرای مخلوط آسفالتی مندرج در ضوابط را برآورده نماید.

و نمی‌توان برای سنگ‌دانه‌های سبک، سنگین یا بازیافتی استفاده کرد (AASHTO, 2008; Hall et al., 2009).

این جدول نشان می‌دهد ایالات مختلف آمریکا برای شاخص صیقلی شدن سنگ‌دانه (PSV)، متناسب با میزان ترافیک، مقادیر مختلفی را پیشنهاد داده‌اند که عموماً مقادیر بیش از ۳۰ تا ۳۵ است. در کشورهای اروپایی نیز براساس پارامترهایی مانند درجه اهمیت راه، مقدار متوسط ترافیک روزانه و نوع راه (آزادراه، راه دوطرفه)، شیب طولی، نزدیکی به تقاطع‌ها، میدان‌ها و ... مقادیر مختلفی را برای PSV مورد نیاز از حداقل ۵۰ تا ۶۸ ذکر کرده‌اند که نشان از توجه ویژه آنها به موضوع ایمنی حمل و نقل جاده‌ای است (Hampshire Highways, 2016). جداول (۶)، (۷)، (۸) و (۹) طبقه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در عملیات اجرای آسفالت رویه راه‌ها را در کشورهای فرانسه، انگلستان و اسپانیا نشان می‌دهند. شایان ذکر است در بسیاری از کشورهای دیگر نیز معمولاً به تبعیت از مندرجات استانداردهای کشورهای اروپایی (یا آمریکا) حداقل PSV سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط رویه آسفالتی را در مشخصات فنی عملیات راهسازی درج کرده‌اند. به عنوان مثال در کشور هند حداقل PSV سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی داغ که به روش BS:812-114 تعیین می‌شود، برابر ۵۰ درصد توصیه شده است (IRC, 2013). در مشخصات عمومی راه‌های کشور ترکیه نیز حداقل PSV سنگ‌دانه‌های انواع مخلوط آسفالتی که به روش BS EN 1097-8 اندازه‌گیری می‌شود، مطابق جدول (۱۰) توصیه شده است (KGM, 2013).

مرور کلی روی حدود ارائه شده برای مشخصات سنگ‌دانه‌ها از نظر مقاومت لغزشی، نشان می‌دهد این حدود در کشورهای اروپایی معمولاً سخت‌گیرانه‌تر از حدود پیشنهادی در ایالات

جدول ۶. طبقه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در عملیات اجرای آسفالت رویه راه‌ها در فرانسه (Nicholls, 1998)

طبقه	حداکثر سایش لوس آنجلس	شاخص صیقلی شدن
A	۱۵	۵۵
B	۲۰	۵۰
C	۲۵	۵۰
D	۳۰	۵۰
E	۴۰	۵۰

جدول ۷. حداقل PSV سنگدانه‌های مورد استفاده در رویه آسفالتی در ضوابط قدیمی تر راه‌های انگلستان (Hosking, 1992)

حداقل PSV	حجم ترافیک وسایل نقلیه تجاری (سنگین) در خط عبور در یک روز	شرح	نوع محل
۶۰ ۷۰ ۷۰ ۷۵	- کمتر از ۲۵۰ - ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ - ۱۰۰۰ تا ۱۷۵۰ - بیش از ۱۷۵۰	- نزدیک به چراغ راهنمایی با محدودیت سرعت حداکثر ۶۰ کیلومتر بر ساعت - نزدیک به چراغ راهنمایی، تقاطع عابر پیاده و نقاط مشابه مخاطره آمیز شهری	A1 (شرایط بسیار سخت)
۶۰ ۷۰ ۷۰ ۷۵	- کمتر از ۱۷۵۰ - ۱۷۵۰ تا ۲۵۰۰ - ۲۵۰۰ تا ۳۲۵۰ - بیش از ۳۲۵۰	- نزدیک به تقاطعات اصلی که ترافیک کامیون‌ها بیش از ۲۵۰ عدد در روز در خط عبور است - میداين و مسیرهای منتهی به آن - قوس‌های با شعاع کمتر از ۱۵۰ متر واقع در راه‌های با حداکثر سرعت ۶۴ کیلومتر بر ساعت - سرازیری‌های با شیب مساوی یا بیشتر از ۵ درصد و با طول بیشتر از ۱۰۰ متر	A2 (شرایط سخت)
۵۵ ۶۰ ۶۵	- کمتر از ۱۷۵۰ - ۱۷۵۰ تا ۴۰۰۰ - بیش از ۴۰۰۰	- در قسمت‌های مستقیم و قوس‌های با شعاع بزرگ در آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها، راه‌های اصلی و راه‌های دیگر با حجم ترافیک بیش از ۲۵۰ وسیله نقلیه سنگین در خط عبور در هر روز	B (شرایط متوسط)
۴۵	-	- قسمت‌های مستقیم در راه‌های با ترافیک سبک - سایر راه‌هایی که احتمال تصادف در آب و هوای بارانی وجود ندارد	C (شرایط آسان)

جدول ۸. حداقل PSV سنگدانه‌های درشت مورد استفاده در رویه آسفالتی در ضوابط راه‌های انگلستان (به جز رویه‌های نازک آسفالتی)

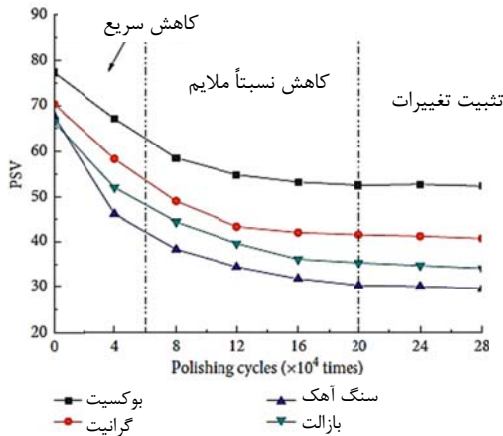
(DRMB-CD236, 2020)

PSV مورد نیاز براساس سطح تحقیق، میزان ترافیک و نوع محل										سطح تحقیق	شرح	دسته‌بندی محل
ترافیک بر حسب تعداد وسایل نقلیه سنگین در خط عبور در روز در عمر طراحی												
بیش از ۱۰۰۰۰	۵۰۰۰-۱۰۰۰۰	۲۰۰۰-۵۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۵۰-۵۰۰	۱۰۰-۲۵۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱۰-۲۵	۱-۲۵		
۶۵	۶۵	۶۰	۵۵	۵۵	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰/۳	آزادراه	A
۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۶۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰/۳۵		
۶۵	۶۵	۶۰	۵۵	۵۵	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰/۳		
۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۶۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰/۳۵	راه با جریان آزاد و ترافیک یک طرفه	B
۶۸+	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۰	۵۵	۵۰	۵۰	۵۰	۰/۴		
۶۵	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۵۵	۵۰	۵۰	۵۰	۰/۳۵	راه با جریان آزاد و ترافیک دو طرفه	C
۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۰/۴		
۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۰/۴۵		
HFS	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۰/۴۵	نزدیک تقاطعات، نزدیکی میداين و چراغ‌های راهنمایی	Q
HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۵	۰/۵		
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۰/۵۵		
HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۵	۰/۵	نزدیک تقاطع عابر پیاده و دیگر موقعیت‌های پرخطر	K
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۰/۵۵		
۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۵۰	۰/۴۵	میداين	R
۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۰/۵		

۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۰/۴۵	سرازیری با شیب‌های ۵ تا ۱۰٪ و طول بیشتر از ۵۰ متر	G1
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۶۰	۰/۵		
۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۰/۴۵	سرازیری با شیب بیشتر از ۱۰٪ و طول بیشتر از ۵۰ متر	G2
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۶۰	۰/۵		
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۰/۵۵	قوس‌های با شعاع کم‌تر از ۵۰۰ متر (راه‌های با ترافیک یک طرفه)	S1
HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۵۰	۰/۴۵		
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۶۸+	۰/۵	قوس‌های با شعاع بزرگ‌تر از ۵۰۰ متر (راه‌های با ترافیک دو طرفه)	S2
HFS	HFS	۶۸+	۶۸+	۶۵	۶۵	۶۰	۶۰	۵۵	۵۰	۰/۴۵		
HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	HFS	۰/۵۵		

\* در سرعت ۵۰ km/h با تجهیزات SCRIM  
HFS=High Friction Surfacing

شکل ۲. تغییرات PSV با افزایش تعداد دور صیقلی شدن ( Guan et al., 2018)



### ۵- نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی انجام شده در پژوهش حاضر موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتیجه‌گیری برشمرد:

- بررسی آزمایش‌های ارزیابی سنگ‌دانه برای ایجاد مقاومت لغزشی مناسب در مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد اولاً این آزمایش‌ها از تنوع زیادی برخوردارند و ثانياً هیچ آزمایشی به تنهایی پیش‌بینی دقیق و کاملی از عملکرد مقاومت لغزشی ارائه نمی‌دهد. همچنین بین نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف همیشه نمی‌توان همبستگی مناسبی را مشاهده کرد.

- برای شناسایی نوع سنگ‌دانه قابل قبول، ضروری است از انجام آزمایش در کنار بررسی تاریخیچه عملکرد میدانی استفاده شود.

جدول ۹. حداقل PSV سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی رویه راه‌های اسپانیا (PG-3, 2015)

شاخص صیقلی شدن	تعداد وسایل نقلیه سنگین در روز
$\geq 56$	بیشتر ۲۰۰۰
$\geq 50$	۲۰۰۰ تا ۱۰۰
$\geq 44$	کمتر از ۱۰۰

جدول ۱۰. حداقل PSV سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در انواع آسفالت براساس مشخصات عمومی راه‌های ترکیه (KGM, 2013)

شاخص صیقلی شدن	نوع آسفالت
$\geq 50$	رویه (توپکا)
$\geq 35$	آستر (بیندر)
$\geq 50$	آسفالت با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA)
$\geq 50$	آسفالت متخلخل
$\geq 40$	آسفالت سطحی
$\geq 40$	اندود آب‌بند (اسلاری سیل، میکروسرفیسینگ یا ...)

21. Steel slag  
22. Calcined bauxite

- ایالات مختلف آمریکا برای شاخص صیقلی شدن سنگ‌دانه، متناسب با میزان ترافیک، مقادیر مختلفی را پیشنهاد داده‌اند که عموماً مقادیر بیش از ۳۰ تا ۳۵ است.

- در کشورهای اروپایی براساس پارامترهایی مانند درجه اهمیت راه، مقدار متوسط ترافیک روزانه و نوع راه (آزادراه، راه دوطرفه)، شیب طولی، نزدیکی به تقاطع‌ها، میدان‌ها و ... مقادیر مختلفی را برای صیقلی شدن سنگ‌دانه مورد نیاز از حداقل ۵۰ تا ۶۸ ذکر کرده‌اند که این مقادیر عموماً بیش از مقادیر متناظر در کشور آمریکا است. البته یکی از دلایل تفاوت بین سطوح آستانه صیقلی شدن سنگ‌دانه در کشورهای اروپایی و ایالات مختلف آمریکا، مدت زمان سایش سنگ‌دانه‌ها است. مدت زمان صیقلی شدن سنگ‌دانه‌ها براساس استانداردهای ASTM D3319 و AAHTO T279 برابر ۱۰ ساعت و در استاندارد BS EN 1097-8 این زمان برابر ۳ یا ۶ ساعت است.

## ۸-مراجع

-AASHTO, (2008). Guide for Pavement Friction, Washington, D.C.

-Asphalt Mix Design Methods (MS-2), (2014). Asphalt Institute, 7th Edition.

-ASTM D692/D692M, (2015). Standard Specification for Coarse Aggregate for Bituminous Paving Mixtures.

-ASTM D1073, (2016). Standard Specification for Fine Aggregate for Asphalt Paving Mixtures.

-Dahir, S.H. and Henry, J.J., (1978). Alternatives for the Optimization of Aggregate and Pavement Properties Related to Friction and Wear Resistance. Report No. FHWA-RD-78-209, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.

-Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), (2020). Pavement Design, CD 236, Surface course materials for construction, Highways England.

- Federal Highway Administration (FHWA). (2005). Surface Texture for Asphalt and Concrete Pavements. Technical Advisory T 5040.36, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

-FP-14, Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects, (2014). Federal Highway Administration (FHWA).

- Guan, B., Wu, J., Xie, C., Fang, J., Zheng, H. and Chen, H., (2018). Influence of macrotexture and microtexture on the skid resistance of aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering*.

- Hall, J.W., Smith, K.L., Titus-Glover, L., Wambold, J.C., Yager, T.J. and Rado, Z., (2009). Guide for pavement friction. *Final Report for NCHRP Project 01-43*.

-Hampshire Highways, (2016). *Surfacing Options & Guidance*.

-Hosking, R., (1992). Road aggregate and skidding. *Transport Research*.

## ۶- سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از بخشی از طرح پژوهشی با عنوان «تهیه و تدوین دستورالعمل مقاومت لغزشی رویه‌های آسفالتی در عملیات ساخت و بهسازی راه‌ها»، است که طی قرارداد شماره ۱۷۸۵۴۲/۷۶ بین سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی منعقد شده است. بدینوسیله از حمایت‌های سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای و کارشناسان و مدیران این سازمان که امکان انجام پژوهش حاضر را فراهم آوردند سپاسگزاری می‌شود.

## ۷- پی‌نوشت‌ها

1. Micro-Texture
2. Macro-Texture
3. Foot print
4. Mega-Texture
5. Unevenness
6. Hardness
7. Mineralogy
8. Angularity
9. Abrasion Resistance
10. Polish Resistance
11. Soundness
12. Mohs Scratch Hardness
13. Elongated
14. Flat and Elongated
15. Open-Graded Friction Course (OGFC)
16. Harsh Climates
17. Micro-Deval
18. Canadian Standards Association
19. Acid Insoluble Residue (AIR)
20. Polished Stone Value

- MDOT-MSMT 216, (2012). Maryland Standard Method of Test (MSMT) 216, *Measuring Frictional Properties of Aggregates using the Dynamic Friction Tester*.
- Nataadmadja, A.D., Wilson, D.J., Costello, S.B. and Do, M.T., (2015). Correlating laboratory test methodologies to measure skid resistance of pavement surfaces. *Transportation Research Record*, 2506(1), 107-115.
- Nicholls, J.C., (1998). Asphalt Surfacing, A Guide to Asphalt Surfacing's and Treatments Used for the Surface Course of Road Pavements, CRC Press.
- PG-3, (2015). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de arretaras y Puentes (PG-3). *Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento*.
- Sandburg, U., (1997). Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy, and Safety: A State-of-the-Art Study Regarding Measures and Measuring Methods, VTI Report 53A-1997, Swedish National Road Administration, Borlange, Sweden.
- Senior, S.A. and C.A. Rogers, (1991). Laboratory Tests for Predicting Coarse Aggregate Performance in Ontario. *Transportation Research Record* 1301, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- TEX-438-A, (2014). Test Procedure for Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate.
- Woodside, A.R., Lyle, P., Woodward, W.D.H. and Perry, M.J., (1998). Possible problems with high PSV aggregate of the gritstone trade group. Geological Society, London. *Engineering Geology Special Publications*, 13(1), 159-167.
- Wu, Y., F. Parker, and K. Kandhal. (1998). Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements, NCAT Report 98-04, *National Center for Asphalt Technology (NCAT)*. Auburn, Alabama.
- Henry, J.J., (2000). Evaluation of Pavement Friction Characteristics, NCHRP Synthesis 291, *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*, Washington, D.C.
- IRC (Indian Roads Congress), (2013). Specifications for road and Bridge works.
- Ji, K., Shi, C., Jiang, J., Tian, Y., Zhou, X. and Xiong, R., (2023). Determining the Long-Term Skid Resistance of Steel Slag Asphalt Mixture Based on the Mineral Composition of Aggregates. *Polymers*, 15(4), 807-808.
- Kandhal, P.S., F. Parker Jr., and R.B. Mallick, (1997). Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of the Practice, NCAT Report No. 97-6, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn, Alabama.
- Kandhal, P.S. and F. Parker Jr., 1998. Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. NCHRP Report 405, *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*, Washington, D.C.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi.
- Li, S. and Liu, Z., (2023). Using bauxite as alternative for coarse aggregate in asphalt mixture: Improving skid resistance. *Construction and Building Materials*, 394, 131915-131916.
- Liang, R.Y. (2003). Blending Proportions of High Skid and Low Skid Aggregate. *Final Report prepared for Ohio Department of Transportation (ODOT)*, Columbus, Ohio.
- Liang, R.Y. and L.L. Chyi, (2000) Polishing and Friction Characteristics of Aggregates Produced in Ohio. *Report No. FHWA/OH-2000/001*, Ohio Department of Transportation, Columbus, Ohio.
- MDOT, (2020). Standard Specifications for Construction and Materials. (*Maryland Department of Transportation State Highway Administration*),
- MDOT-MSMT 215, (2012). Maryland Standard Method of Test (MSMT) 215. *Laboratory Method of Polishing Aggregates using the Circular Track Polishing Machine*.

# **An overview on Tests and Specification Limits of Aggregates to Create an Appropriate Skid Resistance in Asphalt Pavement**

*Ahmad Mansourian, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran.*

*Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*Shahin Shabani, Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.*

*E-mail: a.mansourian@bhrc.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

Appropriate skid resistance is one of the important requirements in road paving; because this factor plays a decisive role in the safety of vehicle traffic, especially in rainy conditions. The fine texture of the asphalt surface, which primarily depends on the characteristics of the aggregates used in the asphalt mixture, plays a fundamental role in creating friction and skid resistance between the pavement and the vehicle tire; Therefore, it is necessary to ensure the proper quality of the aggregates before preparing the asphalt mixture. Because institutions and researchers have proposed various tests for this purpose, in the present study, while introducing each of these tests, the specifications limits for the parameters obtained from each of the tests have also been presented. The investigations show that no single test can indicate the optimal performance of the aggregate in the required skid resistance in the asphalt pavement; Meanwhile, a specific limit cannot be introduced for the output of these experiments. The suggested limits or values obtained from research and experiences can be considered as a primary guide in determining the test criteria related to the performance of aggregates in creating an appropriate skid resistance in asphalt pavement.

**Keywords:** Skid Resistance, Pavement, Asphalt, Aggregate, Specification Limits